



TITLE:

発電機衝撃電圧試験に関する研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

上之園, 親佐

CITATION:

上之園, 親佐. 発電機衝撃電圧試験に関する研究. 京都大学, 1959, 工学博士

ISSUE DATE:

1959-06-20

URL:

<https://doi.org/10.14989/161916>

RIGHT:

454

発電機衝撃電圧試験に関する研究

昭和30年2月15日

上之園親佐

発電機衝撃電圧試験に関する研究

電力部 第二電力課

上之園 親 佐

DOC

1956

1

電気系

内 容 梗 概

本論文は水車発電機に対する衝撃電圧試験について述べたものである。発電機を雷害より保護するため回転機用避雷器と保護用蓄電器の設置が推奨されているが、発電機の基準衝撃絶縁強度については明確にされていない。また発電機の故障事故はその大半が巻回間絶縁の破壊に基づいているので、巻回間絶縁強度を強化することが要望され、組立てられた発電機固定子巻線の巻回間絶縁が所定の絶縁強度を有しているか否かを確かめるためには衝撃電圧試験によるのが最も合理的と考える。

以上二つの目的をもった発電機に対する衝撃電圧試験について、実験データを基礎に考究した論文である。

本論文は緒言、結言、6章より構成されている。各章の論旨は次の通りである。

緒言においては発電機の基準衝撃絶縁強度の制定と巻回間絶縁を強化し所定の絶縁強度をもたせるために最も合理的でかつ実際的である衝撃電圧試験の必要性を述べた。

第1章は水車発電機の構造（衝撃電圧試験に必要な範囲に限る）、巻線方式および絶縁仕様について述べ、供試発電機の定格仕様について概説した。

第2章は回転子が挿入されていない状態における固定子巻線の過渡波動インピーダンスを第二京大法を用いて測定し、その結果に対して検討したものである。

多導線系回路の理論を適用し過渡波動インピーダンスを検討した結果、固定子巻線の各相分波動インピーダンスは正相分波動インピーダンスに等しいが、幾分か小さく、各相巻線はそれぞれ単一回路として考察することができる。巻線間の相互インダクタンスは負の符号をもって作用し、同相巻線内の線輪間の相互インダクタンスは正の符号をもって作用し、巻線間の誘導係数は主として溝内のみであるので送電線とは著しく相違している。また過渡波動インピーダンス波形は線輪の配置によって異なり、進行波の波頭の減衰、変歪が大であるので、反対波の始端到達時刻が不明確である。筆者は反射点を求める一方法を提案した。

第3章は回転子磁極および巻線の固定子巻線の過渡波動インピーダンスに与える効果について述べたものである。

回転子磁極の存在により、固定子線輪の漏洩インダクタンスは増し、鉄心の表皮効果による、異効抵抗が増し、固定子巻線の波動インピーダンスは回転子が挿入されていない時より大きく、過渡波動インピーダンス波形の波頭が円味を帯び時間とともに増加している。制動巻線は固定子巻線の波動インピーダンスを減少せしめる効果を有する。回転子巻線は固定子巻線の波動インピーダンスになんら効果を及ぼさない。

固定子巻線に単位電流を流入したとき回転子巻線の両端子に誘導される電圧は磁極鉄心の鉄皮効果のため抑制される。

第4章は固定子巻線の電圧分布、線輪分担電圧（巻回間分担電圧）を実験的に求めたもので、特に印加波形の波頭長と巻回間分担電圧との関係曲線を求めた。理論的には線輪を第1種梯子型回路とし、巻線をその縦筋回路として巻線の対地電圧、線輪分担電圧の式を誘導し、線輪間の相互インダクタンスが無視される場合は実験結果と一致することを述べた。

第5章は衝撃電圧試験に関して述べたもので、特に試験電圧および試験波形について論及した。

試験電圧は回転機用避雷器の制限電圧をベースとし、放電電流による電圧降下、絶縁の劣化による絶縁耐力の低下および裕度として制限電圧の10%を見込んで決定した。試験波形は $+ (3 \times 40) \mu s$ とし、波頭長の裕度は $3 \sim 3.5 \mu s$ にとった。

第6章は衝撃電圧試験における巻回間の絶縁破壊の検出法について述べたものである。

巻回間の検出には巻回間絶縁破壊による巻線の電圧分布変化、波動インピーダンスの減少からくる接地電流の増加および漏洩インダクタンスの変化を利用することを提案し、検出法として、電圧法、電流法および電磁誘導法について述べ、実際に適用した例をも併せて述べたものである。

結言は各章で論述した要旨を集約して述べたものである。

目 次

緒 論	1
第 1 章 同期発電機の構造と供試発電機	5
§ 1.1. 構造の概要	5
1.1.1. 固定子溝の構造について	5
1.1.2. 固定子鉄心の長さ	6
1.1.3. 界磁極片と回転子線輪	6
1.1.4. 制 動 巻 線	6
§ 1.2. 線輪の構造と絶縁仕様	7
1.2.1. 線輪の形状と平均の長さ	7
1.2.2. 線輪の絶縁仕様	7
1.2.3. 線輪の漏洩インダクタンス対地および巻回間静電容量	11
§ 1.3. 固定子巻線	13
1.3.1. 固定子巻線の種類	13
1.3.2. 極間接線法	14
§ 1.4. 供試発電機	17
第 2 章 発電機巻線の衝撃波特性 (その 1)	35
回転子がない状態における固定子巻線の衝撃波特性	
§ 2.1. 緒 言	35
§ 2.2. 固定子巻線の初期進行波特性	36
2.2.1. 対称三相線路として取扱った時の対称分波動インピー ダンス	36
2.2.2. 固定子巻線の結合係数と巻線法に対する考察	55
2.2.3. 考察の総括	61
§ 2.3. 固定子巻線の過渡波動インピーダンスについて	62
2.3.1. 過渡波動インピーダンスの形による分類	62
2.3.2. 過渡波動インピーダンスに及ぼす巻線方式の影響につ いて	62
2.3.3. 過渡波動インピーダンスの初期値について	67
§ 2.4. 波頭の減衰, 変歪および伝播速度	70
2.4.1. 波頭の減衰および変歪	72
2.4.2. 波頭の伝播速度	72
§ 2.5. 結 言	77
第 3 章 発電機巻線の衝撃波特性 (その 2)	79
回転子が挿入されている状態における固定子巻線の衝撃波 特性	

§ 3.1	諸 言	79
§ 3.2	巻線の過渡波動インピーダンスに与える回転子の影響につ いて	79
3.2.1	各相巻線の過渡波動インピーダンス波形	79
3.2.2	回転子巻線の過渡波動インピーダンスに与える影響	87
3.2.3	回転子磁極による溝漏洩磁束の増加について	89
3.2.4	回転子磁極の鉄心中の表反効果について	93
§ 3.3	制動巻線を有する発電機巻線の過渡波動インピーダンス	94
3.3.1	制動巻線を有する場合の固定子巻線の過渡波動インピ ーダンス波形	94
3.3.2	制動巻線の過渡波動インピーダンスに与える影響	98
§ 3.4	回転子巻線	98
3.4.1	1,000 kVA 発電機の実測結果	98
3.4.2	40 kVA 発電機の実測結果	100
3.4.3	固定子巻線と回転子巻線との結合について	100
§ 3.5	結 言	103
第 4 章	発電機巻線の衝突波特性 (その 3)	105
	発電機巻線の線輪の対地電圧、分担電および回転子巻線へ の誘導電圧	
§ 4.1	諸 言	105
§ 4.2	固定子巻線の電位振動に対する理論的考察	106
4.2.1	1 相分の巻線を 4 端子縦続回路として考察した場合の 理論式	107
4.2.2	理論式に対する検討	112
§ 4.3	基礎的実験	116
4.3.1	巻線中の対地電圧分析	116
4.3.2	線輪の分担電圧	118
§ 4.4	運転状態における巻線の電位分析	121
4.4.1	実 測 結 果	122
4.4.2	考 察	128
§ 4.5	発電機巻線の対地電圧分析	129
4.5.1	回転子磁極による固定子巻線の電圧分析への影響	130
4.5.2	他相巻線を開放短絡した時の巻線の対地電圧	132
4.5.3	各相巻線間の対地電圧および接地電流の不平衡	132
§ 4.6	発電機巻線の線輪分担電圧	136
4.6.1	回転子の分担電圧への影響	136
4.6.2	印加波の波頭長と分担電圧	137

§ 4.7	回転子巻線の誘起電圧	147
4.7.1	400 kVA 発電機の試験結果	147
4.7.2	4,800 kVA	149
4.7.3	11,000 kVA	152
§ 4.8	結 言	155
第 5 章	発電機衝撃電圧試験波形と試験電圧	157
§ 5.1	緒 言	157
§ 5.2	発電機の絶縁強度	158
5.2.1	絶縁破壊試験の方法	158
5.2.2	試験結果と旧品発電機の絶縁耐力	159
5.2.3	最近製作される発電機の絶縁耐力	163
5.2.4	考 察	166
§ 5.3	試験電圧の波高値の決定	169
5.3.1	回転機用避雷器について	169
5.3.2	接地抵抗による電圧降下と絶縁劣化による絶縁耐力の 低下について	171
5.3.3	試験電圧の決定	171
§ 5.4	試 験 波 形	174
5.4.1	常時運転中にかかる巻回間電圧を基準とした波頭長	174
5.4.2	旧品発電機の運転中にかかる巻回間電圧に $(\sqrt{2} \times 1.25 \times 40)$ を乗じた値が巻回間絶縁の保証耐力とした時の 第 4.44 図の曲線より求めた試験電圧に対する波頭長	175
5.4.3	第 5.2 表の巻回間絶縁破壊電圧と第 5.20 表の試験電圧 を印加した時の破壊となるような波頭長	176
5.4.4	巻回間絶縁寸法に対する検討	176
5.4.5	波尾長について	177
§ 5.5	衝撃電圧試験について	177
5.5.1	衝撃試験電圧波高値の認定	177
5.5.2	試 験 要 項	178
§ 5.6	結 言	179
第 6 章	発電機巻線の故障検出	181
§ 6.1	緒 言	181
§ 6.2	線輪および巻回間の短絡による巻線の漏洩インダクタンス の減少について	181
6.2.1	線輪および巻回間短絡による漏洩インダクタンスの減 少	181

6.2.2	40kVA (3.3kV) 発電機の巻線の漏洩インダクタンス	182
6.2.3	考 察	184
§ 6.3	線輪の短絡が過渡波動インピーダンス, 巻線対地電圧および接地電流に与える影響について	185
6.3.1	過渡波動インピーダンスに及ぼす影響	185
6.3.2	巻線の対地電圧および接地電流に及ぼす影響について	191
§ 6.4	巻回間短絡の検出の原理と方法	202
6.4.1	対地電圧の変化による巻回間短絡の検出	202
6.4.2	接地電流の変化による	206
6.4.3	漏洩磁束の変化による	206
§ 6.5	実 測 例	207
6.5.1	11kV, 1,000kVA 発電機	207
6.5.2	3.45kV, 400kVA 発電機	215
6.5.3	6.6kV, 4,375kVA 発電機	226
§ 6.6	結 言	233
結 言		235

緒論

発電機は電力発生に欠くべからざるもので、これに関する理論的研究は中古において E. Arnold および C. P. Steinmetz 氏等によってその根底が築かれ、その後ますます進歩し、他方製作技術の発達も伴って今日の優秀な発電機が製作されるに至っている。発電機の絶縁に関する研究は古くより行われているが、その研究の困難性はその進歩に顕著なものがあらわれていないことから推察できる。そのよって我々の所は次の如く考える。

発電機の絶縁は乾式である上に絶縁手法が溝の大きさにより限定されるので、変圧器の如く油浸型の絶縁とは絶縁仕様において根本的に異なる。この点は一ツの宿命論的のものでもある。また線輪の絶縁施行は大部分が職人の手においてなされる手工業の域にあること、使用材料が均一な電気的特性を有しないため均一に絶縁を施行出来ないことが挙げられる。

第二次世界大戦後わが国では発電機の焼損事故が、戦時中の苛酷な運転と保守の不備とが相俟って多くなり、発電機の絶縁劣化を早期に検出する方法が各所において研究されるに至って、発電機の絶縁に関する諸問題が一般に研究、討議されるようになった。今日ではサマイカフェイル、合成樹脂系の接着剤等新しい絶縁材料が出現するとともに絶縁処理の技術をも大分改善されてきている。

発電機は電力系統の重要な要素であることは前述した通りであるが、送電線には大抵の場合変圧器を通して接続されていることと、直接発電機電圧で配電している場合においても電圧が低いので、雷および異常電圧に対する保護が変圧器ほど重要視されていなかった。しかるに近年発電機を雷害より保護するため、回転機用避雷器、保護蓄電器の設置が問題となり、電気協同研究会主催の送電雷害防止専門委員会においてそれぞれ審議され、回転機用避雷器規格^①、回転機保護蓄電器設置要綱^②が作成され、各所の発電所において採用されてきている。

変圧器の衝撃基準絶縁強度は JEC 110 変圧器衝撃電圧試験標準規格において明かにされているが、発電機においてはまだ衝撃基準絶縁強度は明かにされていない。したがって回転機用避雷器および回転機保護蓄電器が設置されても発電機の絶縁がこれら保護範囲外、例えば対地絶縁の衝撃絶縁強度が回転機用避雷器の制限電圧以下であるような場合においては、これら保護装置を設置した意義は失われるのである。また巻回間絶縁は従来運転中にかかる巻回間電圧をベースに絶縁が考えられていたようであるが、巻回間絶縁の絶縁強度をも明かにする必要がある。昭和25年4月より9月まで6ヶ月の発電機事故を旧日本発送電水力課で調査した結果を示したのが第1表である。この表から巻回間短路よりの焼損事故が大抵焼損事故の半数を占めている。さらに発電機事故に関する事故統計は荻野氏が旧日電における昭和17年より昭和24年まで8年間の

第 1 表 事 故 統 計

	故 障 個 所					損 傷 状 況				焼 損 経 過			
	導 内	導 外	浸 水	不 明	合 計	巻 回 間 絶 縁	対 地 絶 縁	不 明	合 計	如 初 焼 損	5 回 以 上	6 回 以 上	合 計
件 数	29	4	1	3	37	17	16	4	37	14	15	8	37
百分率	78.5%	10.8%	2.9%	8.1%	100%	45.9%	43.3%	10.8%	100%	37.8%	40.5%	21.7%	100%

(註) 導内にてコイル破壊
巻回間絶縁と報告してきたもの
今回初めて焼損せるもの
導外においてコイル破壊
接地と報告してきたもの
今回を含めて5回以内焼損したもの
浸水により絶縁低下したもの
報告なく不明のもの
報告なく不明のもの
今回を含めて5回以上焼損したもの

③ 事故を調査した結果を発表している。この結果においても巻回間の短絡よりの事故は焼損事故の半分以上を占めている。このように巻回間絶縁が弱いことは、折角発電機の巻回間絶縁の保護として保護蓄電器を設置しても、侵入波による巻回間絶縁破壊より、自然劣化と称する事故を惹き起すが、また外部事故の波及によって巻回間絶縁が破壊することが生ずる。また侵入波による巻回間の最大分担電圧を運転中の巻回間電圧以下に抑制するようにするためには設置する保護蓄電器の容量を大きくすると、設置する条件すなわち接続線および接地線の長さを極力縮めること等厳正なることが要求される。佐藤氏は事故統計より保護蓄電器設置前と設置後において事故の減少が保護蓄電器の設置であると結論し得ないと述べているが、これは設置の条件が充分満たされていないことにもよるが、筆者が上記に指摘した点は発電機巻回間絶縁として充分考慮すべき必要がある。

以上述べた如く、侵入波に対する保護装置、すなわち回転機用避雷規格および回転機保護用蓄電機の適用が明確になった今日、これら保護装置との絶縁協調を保つよう発電機の対地絶縁および巻回間絶縁の衝撃基準絶縁強度を定め、侵入波および外部事故の波及よりくる発電機焼損事故を皆無にすることが要求されてくる。

筆者は昭和23年より発電機励磁の全巻帯が実施される発電機を供試機として発電機の衝撃電圧試験を旧日巻の水力課、再編成後は東京電力、東北電力、関西電力および四国電力の御協力を得て行い、発電機の衝撃波特性、衝撃絶縁強度および巻回間絶縁破壊の検出に関する資料を集めて来た。発電機の衝撃電圧試験標準規格を制定するため電力中央研究所主催の回転機衝撃電圧試験標準規格調査委員会が昭和26年9月発足し、標準規格の審議を行い、昭和29年4月に成案を得て、唯今電気学会規格委員会にJECとして採用方をお願いしている。筆者は当委員会の幹事として規格案の審議に参画してきたので、発電機の衝撃電圧試験に関する諸問題を検討する機会に恵まれた。

本論文は、筆者が実施した17台の発電機衝撃電圧試験のデータおよび上記委員会に提出した委員会資料を基にして、発電機の衝撃電圧試験に関して研究した結果を纏めたものである。

本研究の遂行に當って御指導と御鞭撻とを賜わった電力技術研究所富山電力
部^長に謝意を表するとともに上記委員会において御指導を賜わった東京大学教授
藤高周平、電気試験所機器部長工学博士法貴四郎、明治大学教授大槻喬（元東
京工業大学教授）、慶応大学教授森元吉、その外委員各位に對し御礼を申し上げ
る次第である。

なお本論文を纏めるに當っていろいろ御指導を賜わり、特に第二京大法によ
る発電機巻線のインデシャル・インピーダンスの研究に關し御指導を頂いた京都
大学教授林重忠氏に深甚なる謝意を表する。

本研究に必要な発電機の衝擊電圧試験のデータは旧日発の水力課、再編成後
においては東京電力水力発電課、東北電力発電課、関西電力水力課、四国電
力発電課の御好意と実測を行った発電所の所長初め所員各位の御協力による
ものが大きい。また実測に當っては当研究所機器係の御援助に俟つ所が大であ
る。本論文の報告に際し謝意を表する次第である。

4 項欠

第1章 同期発電機の構造と供試発電機

第1章 同期発電機の構造と供試発電機

わが国における電力発生用の発電機はほとんど三相星形結線の交流同期発電機である。したがって発電機の衝撃電圧試験を考究するに当たっては、三相交流同期発電機の構造、巻線方式および絶縁仕様について予備知識を必要とするので、本章においてこれらについてその概要を説明する。なお筆者が本研究に採用した発電機の定格巻線方式および絶縁仕様についても述べておいた。

§1.1 構造の概要

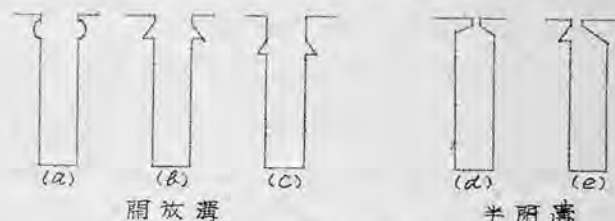
同期発電機は直流により励磁された界磁極と発電子巻線を有する成層鉄心とから構成されている。そのうちいずれを固定子とするかによって回転界磁型、固定子界磁型に分類されるが、現在運転されている同期発電機は前者の型である。したがって本論文では発電子巻線を固定子巻線、界磁巻線を回転子巻線と呼ぶことにする。

発電機の定格電圧は統一され、最近製作された発電機の定格電圧は3,300V、3,450V、6,600Vおよび11,000Vとなっている。昭和29年に完成した関西電力丸山発電所75,000kVA発電機の定格電圧は13,200V、また現在電機開発により建設中の佐久間発電所93,000kVA発電機も13,200Vで、大容量の発電機の出現により定格電圧には高い電圧が採用されている欧米においては12,500V、13,800V、22,000Vの発電機がある。

固定子巻線は数個以上の線輪を接離したものであって、1個の線輪は固定子の鉄心の溝中に詰められた2個の導線群（これを線輪導線と称す）と2個の線輪導線を鉄心の外部で結ぶ導線群（これを線輪端と称す）とから構成されている。

1.1.1 固定子溝の構造について

発電機の固定子溝には開放溝、半閉溝および閉鎖溝の3種類がある。一般に採用されているのは開放溝で、電甲型線輪を溝内に挿入または取り外しに容易であるので線輪の絶縁処理が充分行うことができる。半閉溝には主として単相鎖形巻の発電機に採用されている。この溝は小容量低電圧（6.6kV以下）の発電機または巻回数が少い線輪を有する発電機に採用され、開放溝に比して欠損が少ないが線輪の絶縁が充分施行出来ない欠点がある。鎖形巻が採用されなくなるにつれ、半閉溝の発電機も次第に姿を消しつつあるのが現状である。閉鎖溝はわが国では採用されていない。固定子溝を図示すると第11図である。(a)、(b)、(c)は開放溝で、(d)、(e)は半閉溝である。



溝口の形によって線輪の漏

第1.1図 固定子溝

相互インダクタンスが異なってくる。すなわち溝口の磁気抵抗が異なってくる。

1.1.2 固定子鉄心の長さ

線輪導線の中、鉄心の溝の中に納められている部分の長さをその発電機の固定子の鉄心の見掛け長さと等しいとすると、大体において次式で表わすことができる。

$$l_1 = l + n_d b_a \quad (\text{cm}) \quad (1.1)$$

ただし l_1 : 鉄心の見掛け長さ (cm)

l : 鉄心の正味長さ (cm)

n_d : 通風隙の数

b_a : 通風隙の巾 (cm)

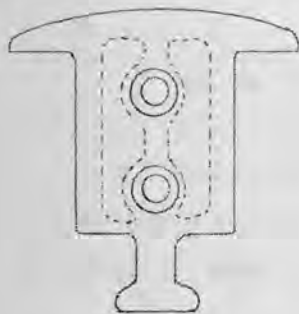
鉄心の長さは発電機の電圧、容量、周波数、極数等に関係する外、電気比表荷、磁気比表荷の選定にも関係するものである。

通風隙の巾は機械の大小にかかわらず大体一定で一般に 10 mm にしている。水車発電機では通風方式として *Radial Ventilation* を採用している場合では両側部は割合に通風隙が少い。最も多いのは両側から鉄心の長さの $\frac{1}{4}$ 位の場所であるが、設計、製作上がう通風隙は中央部が多く、両側では割合少くするのが通例である。

衝撃波の伝播速度は固定子鉄心部においては遅く、したがって巻線の伝播速度は線輪の固定子鉄心に納まっている部分と納らざる部分の割合によって決まる。

1.1.3 界磁極片と回転子線輪

水車発電機の回転子磁極は凸極型である。磁極鉄心はほとんど薄鋼板の抜版を使用し、これを積み重ねて成層鉄心し、圧縮成形したものである。大体の構造を示したのが第 1.2 図である。



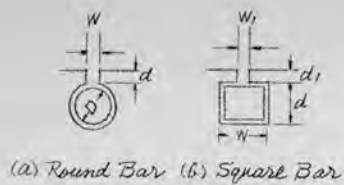
第 1.2 図 磁極片の構造

回転子線輪には主として鈍し銅板を平打巻にし巻重ねたものである。巻回間の絶縁は無鉄アスベスト紙、マイカあるいは赤紙をセラックで銅帯にはりつけたものであったが、最近ではマイカ紙とコンパウトとが用いられている。線輪の内側の絶縁にはファイバーあるいはマイカ紙が使用されている。

1.1.4 制動巻線

同期発電機の制動巻線は磁極面の表面近くに取りつけられた銅または真鍮棒で、その両端を短絡環で接続し、電力系統の動揺に対しては安定度を増すよう制動巻線の抵抗を少くし、短絡、一線接地事故時には電流を抑制するため抵抗が高くなるように設計されている。誘導電動機の籠形巻線に似ている。短絡環の接続箇所の抵抗を少くし、かつ機械的強度を増すため特に注意して工作され

ている。制動巻線に使用する棒は円柱の棒、角棒等である。これらの棒のパーミアンスは第1.3図の各棒の寸法図より次の通り^⑤にあらわされる。



第 1.3 図

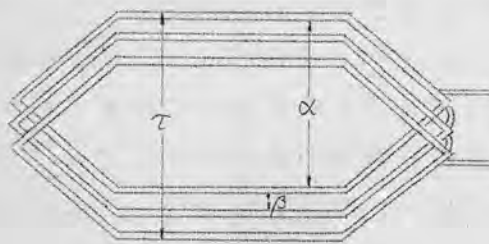
$$\left. \begin{array}{ll} \text{Round Bar} & 1.26 \left\{ 0.62 + \frac{d}{W} \right\} \\ \text{Square Bar} & 1.26 \left\{ \frac{d}{W} + \frac{d_1}{W_1} \right\} \end{array} \right\} \dots\dots (1.1)$$

§ 1.2 線輪の構造と絶縁仕様

発電機の衝撃電圧試験に関しては線輪の構造とその絶縁仕様とを一応知ることが必要である。したがって本節において本研究に必要な範囲の線輪の構造と絶縁について述べる。

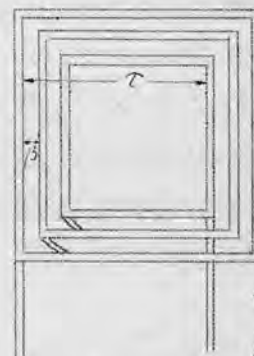
1.2.1 線輪の形状と平均の長さ

発電機の線輪の形状には 亀甲形線輪、鎖形線輪 の2種類があるが、二層、重ね巻には亀甲形線輪、単層鎖形巻には鎖形線輪が使用されている。亀甲形、鎖形の線輪の形を示すと第1.4図、第1.5図の通りである。



T : 磁極間隔
α : 巻節
β : 溝巾

第1.4図 ダイヤモンド型



T : 磁極間隔
β : 溝巾

第1.5図 鎖形

線輪に使用する導体はほとんど焼鈍した軟銅で、丸線または角線のコイル巻、平角銅帯のバーク巻の巻線である。線輪は渦流損失を減ずるため導体は幾つかの素線絶縁をした素線より構成されているが、特に大型の線輪では線輪の端部において転位を施し、渦流損失を減ずるようにしている。

固定子線輪の平均の長さ l_a は一般には次式であらわされる。

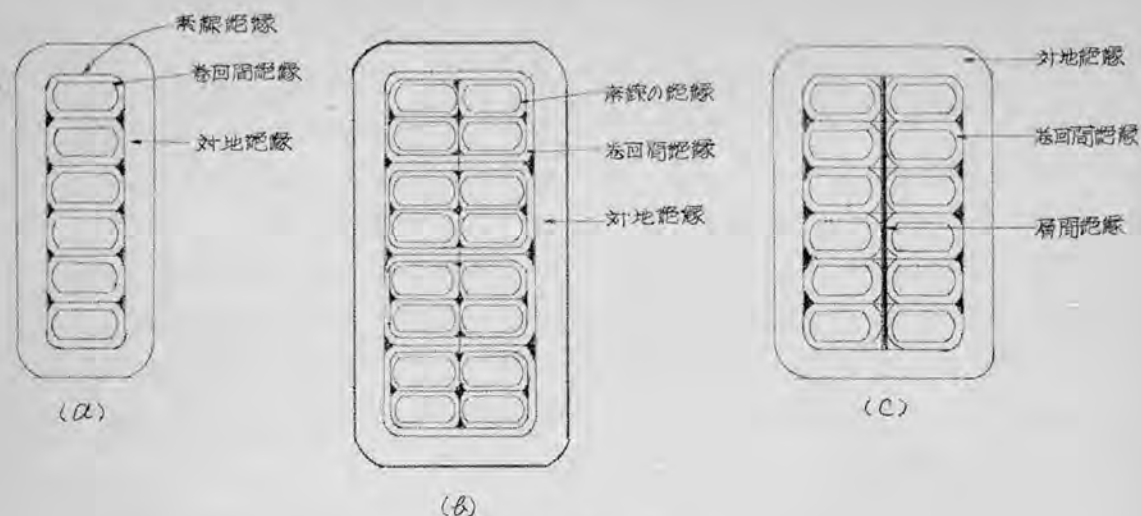
$$l_a = \frac{l_1 + 1.75 T}{100} \quad (m) \quad \dots\dots (1.2)$$

ただし T : 磁極間隔

1.2.2 線輪の絶縁仕様

線輪の絶縁は対地絶縁 (Ground Insulation)、巻回間絶縁 (Turn Insulation)、層間絶縁 (Tier Insulation)、素線の絶縁 (Strand Insulation)

から構成されているが、層間絶縁が採用されているのは定格電圧が高く、容量が極めて小さい発電機であって、その他では使用されない。これら絶縁を図示すると第1.5図 (a), (b), (c) の通りである。



第 1.6 図

線輪の絶縁にはA種絶縁とB種絶縁とがある。A種絶縁はリノテープ・ワニス等のA種絶縁材料を使用した場合、またA種絶縁材料の他に、一部B種絶縁材料を使用した場合で3.3kV以下のものに主として使用される。B種絶縁は主にマイカ紙をアスファルト系あるいは樹脂系の接合剤を用いて接着または含浸して成形したもので6.6kV以上の高圧発電機の線輪に使用されているが、最近電力会社は3.3kVの発電機線輪をもB種絶縁とする傾向がある。それは定格33kVの発電機は比較的発電機電圧で直接配電されているので、その重要さから絶縁を強化している。

素線の絶縁には従来二重綿巻、マイカ紙を $\frac{1}{2}$ ラップ巻したものが主として用いられていたが、最近ではアスベスト、ガラス^{せんい}線織が使用されるようになってきた。素線の絶縁にかかる電圧は運転状態において数分の1Vないし2V程度のものである。また衝激電圧においても素線の絶縁にかかる電圧は大したものではないので、したがって素線の絶縁材料は耐熱、耐圧性を備えているとともに機械的に強靱であることが必要である。絶縁寸法は0.2~0.3mm程度で充分である。

巻回間の絶縁にはマイカテープを $\frac{1}{2}$ ラップ巻したものを接合剤で接着するあるいは含浸剤を真空処理しながら空隙がないように充填している。最近の巻回間絶縁には後者の方が主として採用されている。

運転状態において巻回間にかかる電圧は数Vないし数百Vである。従来巻回間の絶縁はこの巻回間の電圧を設計のベースとしており、したがって、巻回間の絶縁が50V以下では綿テープを $\frac{1}{2}$ 重ね巻した上にホーンファイバー、マイカ紙等のたんごく形（たんごく）のものを巻回間に挿入する方法が採用され、50V以上では上

記したマイカテープ $\frac{1}{2}$ ラップ巻きにする方法が採用されていた。このように運転中における巻回間電圧を設計のベースにすることは、侵入サージに対する巻回間絶縁と対地絶縁強度が、回転機用避雷器、保護蓄電器等の保護装置を考慮した絶縁協調がなんら考慮されていなかったからである。

層間絶縁には第1.6図(C)に示す如く、ホーンファイバー、マイカ紙等のたんざく形ものを挿む方法が採用されているが、巻回間の絶縁においても同様であるが、たんざく形の絶縁物を挿む方法は振動等のため、また空隙を有しているため、今日においては採用されない。また層間絶縁は施行上無理があるので高圧発電機の絶縁にはほとんど採用されない。

対地絶縁にはマイカテープ $\frac{1}{2}$ ラップ巻の上合浸剤を真空処理しながら充填し、加熱圧縮して成形する濕式法と線輪の直線部をマイカ紙に接合剤をもって平巻し、加熱圧縮しながら成形する乾式法とがある。対地絶縁を施行した上で、綿テープを2重ね巻き回巻し、加熱溶解したコンパウンドを塗布浸潤せしめ、固化させ保護外被をつける。保護外被としては綿テープのかわりにアスベストテープを用いることもあり、またスロットライナーを使用することもある。

B種絶縁にした場合の線輪の絶縁寸法がどのようなものであるかの一例を第1.1表に示す。

第 1.1 表^⑥

定格電圧 (V)	絶 縁 の 厚 さ (mm)						
	溝の中の方 (線輪内側分)	溝の深さの方向(線輪2個西側分)					端 部 (線輪西側分)
		1ターン	2ターン	3ターン	4ターン	5ターン	
6600	6.9	13.4	19.2	22.8	25.6	30.5	7.1
11000	9.45	19.2	25.2	28.6	32.1	38.1	9.5
13200	11.2	23.3	29.4	32.8	36.4	43.2	11.6

(註) B種絶縁の場合はターン間に絶縁を用うるゆえ線輪のターンの数により絶縁の寸法が異なる。

最近定格電圧が6,600V以上の発電機ではコロナのため絶縁が濡められぬように線輪の直線部にコロナ防止塗料を塗布するが、この材料はグラファイトをワニスに混ぜたものが使用せられている。

発電機焼損事故の内絶縁劣化に起因しているものが極めて多い。B種絶縁の主要な絶縁材料は型造用マイカ板、マイカテープ、コイル合浸用コンパウンド、加熱乾燥コイルワニス等である。型造用マイカ板、マイカテープは硬質はガレマイカまたは軟質はガレマイカを接着剤で絶縁薄紙あるいは広幅羽二重に適度に加熱圧縮したものである。主に使用されるマイカテープのJISの規格を示すと第1.2表の通りである。マイカ自体は耐熱耐酸性でかつ絶縁耐力は高いのであるが機械的に脆い。そこで絶縁劣化の点から問題となるのは型造用マイカ板、マイカテープに使用する接着剤とコイルの成形に使用する接着剤および合浸剤

第 1.2 表

種 類	公称厚さ×公称幅	許 容 差 厚 さ	耐 電 圧 KV (1分間)
ペ ー パ ー プ マイ カ テ ー プ	0.1×13	+ 0.07 - 0.03	0.6
	0.1×19	+ 0.07 - 0.03	0.6
	0.1×25	+ 0.07 - 0.03	0.6
ペ ー パ ー プ マイ カ テ ー プ	0.13×13	+ 0.09 - 0.04	0.9
	0.13×19	+ 0.09 - 0.04	0.9
	0.13×25	+ 0.09 - 0.04	0.9
	0.18×13	+ 0.12 - 0.06	1.5
	0.18×19	+ 0.12 - 0.06	1.5
	0.18×25	+ 0.12 - 0.06	1.5
シ ル ク マイ カ テ ー プ	0.13×13	+ 0.09 - 0.04	0.9
	0.13×19	+ 0.09 - 0.04	0.9
	0.13×25	+ 0.09 - 0.04	0.9
	0.18×13	+ 0.12 - 0.06	1.5
	0.18×19	+ 0.12 - 0.06	1.5
	0.18×25	+ 0.12 - 0.06	1.5

である。これらの材料は主として前述した含浸用コンパウンドおよび加熱乾燥
コイルワニスである。含浸用コンパウンドの特性を示したのが第1.3表である。

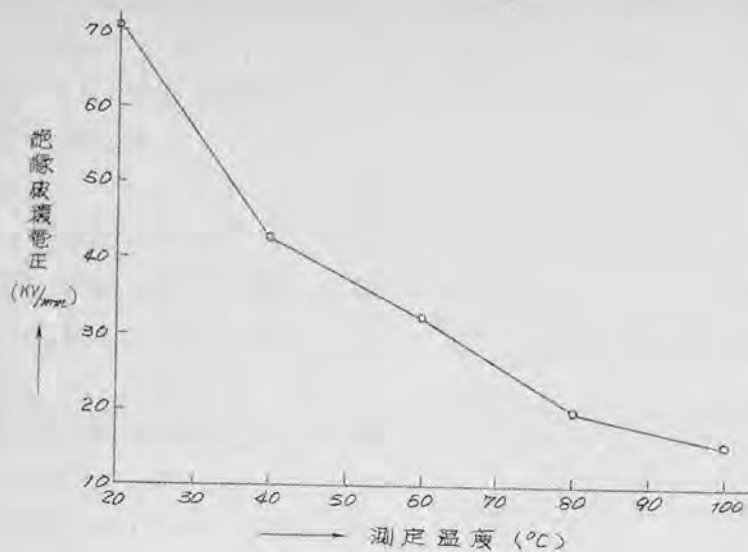
第 1.3 表 含浸用コンパウンドの特性

種 類	軟化点 (°C)	流動性 (mm)	絶縁耐力 (KV/mm)	引火点 (°C)
K-11号コンパウンド	85±5	60以上(160°C)	50以上	230以上
K-12号コンパウンド	105±5	〃 (190°C)	〃	260以上
K-15号コンパウンド	95±5	〃 (160°C)	40以上	230以上

かかる接着剤および含浸剤が発電機の運転温度において長時間使用されると劣
化し絶縁物中に空隙を生じ、コロナの発生となり、そのためますます絶縁物は
痛められ、劣化が促進する結果となる。また一方かかる状態においては絶縁材

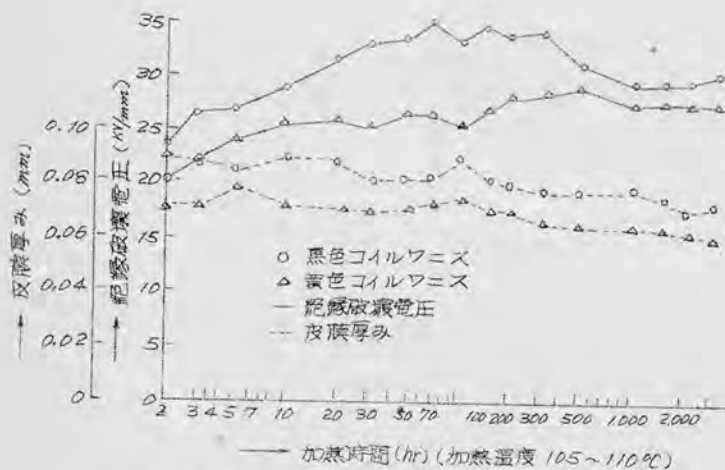
料は脆くなっており、運転中の線輪のしめつけが不十分であると線輪は振動する外、外部事故等により線輪にストレスが加わると絶縁に亀裂が入り絶縁が破壊され易くなる。

コイル含浸用コンパウンドの破壊電圧と温度との関係^⑦を示すと第1.7図の通りで、温度の上昇とともに破壊電圧は低下する。



第1.7図 コイル含浸用コンパウンドの絶縁破壊電圧と温度との関係

り、温度の上昇とともに破壊電圧は低下する。加熱乾燥コイルワニス^⑦の破壊電圧と加熱時間との関係および絶縁の厚みの加熱時間による減少を示したのが第1.8図である。破壊電圧は黄色品が500時間で最高となり、その後は徐々に低下している。皮膜の厚みは加熱温度105~110℃で3,000時間加熱後において初めの厚みの80%に低下しており、電気的性質の变化は加熱時間とともに徐々に進んでいることが報告^⑦されている。



第1.8図 黄色および黒色コイルワニスの絶縁破壊電圧と加熱時間の関係

発電機線輪の絶縁としてはマイカ自体は耐熱、耐酸性で、絶縁耐力は極めて高いが、マイカ片を接着する材料と線輪の成形に使用する

接着剤、含浸剤が発電機の運転温度で劣化しないことが必要条件で、今後その方面の研究が希望される。この点に関しては筆者は電気技術部門委員会技術討議会においても指摘しておいた。

1.2.3 線輪の漏洩インダクタンスと対地および巻回間静電容量

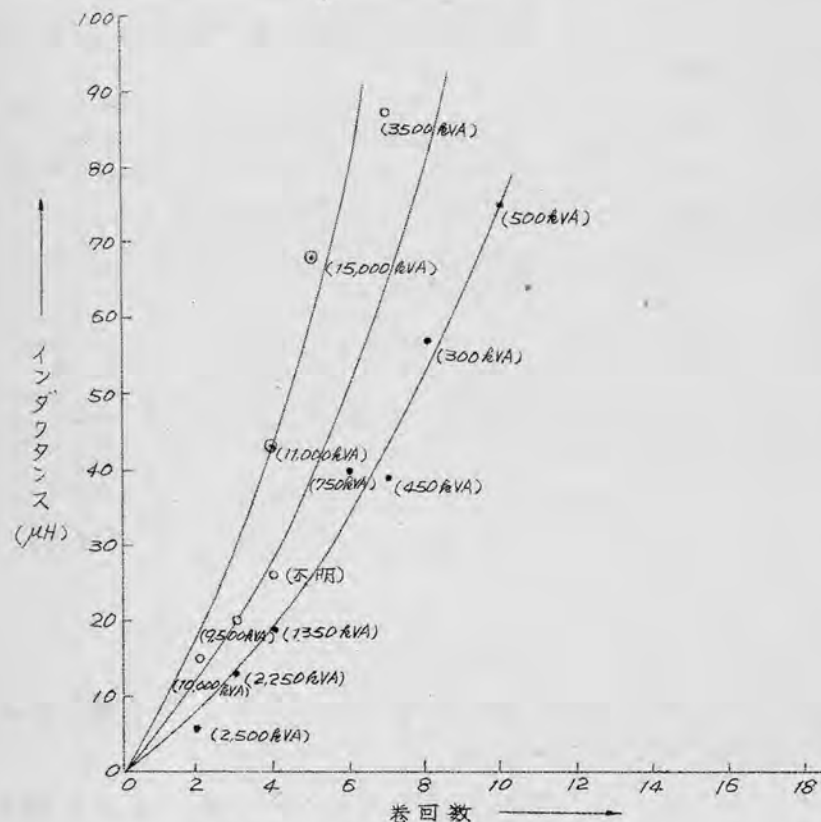
線輪のインダクタンス、対地静電容量および巻回間静電容量について大体的目安をつくるため実測を行った。

(1) 線輪の漏洩インダクタンス

第1.4表 線輪のインダクタンス

番号	定格電圧 (kV)	発電機容量 (kVA)	巻回数 (回)	インダクタンス (μH)
3-1	3.5	200	20	320
3-2	3.3	300	8	57
3-3	"	450	7	39
3-4	3.45	2,500	2	6
3-5	3.5	1,350	4	19
3-6	3.45	500	10	75
3-7	3.5	750	6	40
3-8	3.45	2,250	3	13
6-1	6.6	3,500	7	87
6-2	"	1,600	44	1,240
6-3	"	500	16	231
6-4	"	9,500	3	20
6-5	"	10,000	2	15
11-1	11	300	36	1,250
11-2	"	500	16	232
11-3	"	11,000	4	43

発電機線輪のインダクタンスがどの程度のものであることが知る必要があるので、鉄心の溝に入っていない状態の線輪1本のインダクタンスを測定した。測定には横河製 BV-Z-103A 万能ブリッジに横河製送振増巾器 (DV-CR-201) を接続して用いた。測定周波数は 1kHz である。第1.4表の結果を図示したのが第1.9図である。発電機の容量、定格電圧、回転数等が異なるが大体巻回数の自乗に比例している。特に 3.3kV の線輪は数が多く大体1本の線輪では巻回数と漏洩インダクタンスとの関係を表示することができる。



第1.9図 線輪の漏洩インダクタンス
(12)

(2) 線輪の対地および巻回間静電容量

線輪が溝に納められている断面図を示したのが第1.10図である。

(a)図は二層巻の場合で、(b)図は単層巻の場合である。二層巻においては、一方の線輪導線が上コイルとなっていれば、他方の線輪導体は下コイルとなっている。また第1.2.1頁で述べた如く線輪端部において180°転位して巻かれているので、一方が下コイルとなり溝に納まっている場合の溝の底部に近い巻回線は、その他方の導線は溝の口の近いところに位置している。

単層巻とは線輪自体で転位がなされていない。

巻回線の対地静電容量は各巻回線の側面にある下コイルで溝の底部に位置している巻回線は溝の底部との間に対地静電容量を有している。したがって線輪中の巻回線の対地静電容量は線輪の内部に位置している巻回線と両側に位置している巻回線とは異なってくる。4375kVA, 12kV巻電機線の線輪1本をアルミ箔で巻き、巻回線の対地静電容量を測定したところ、線輪の内側に位置している巻回線は27PF/m₂(シエリングブリッジにより測定)、両側に位置している巻回線は130PF/mであった。なお巻回線間の静電容量は260PFである。

溝内における線輪1本の対地静電容量を1相分巻線の対地静電容量を測定し、巻線の線輪数で除して求めたのが第1.5表である。この表から大体の数値を把握することができる。

第1.5表 溝内の線輪対地静電容量

番 号	巻電機容量 (kVA)	定格電圧 (kV)	回転数 (r.p.m)	線輪1本の静電容量 (P.F)
3 1	400	3.45	—	229
3 2	2,800	3.45	750	2020 (at 55°C)
6 1	3,350	6.6	600	1220
6 2	4,800	6.6	600	1050
6 3	8,000	6.6	375	935
11 1	14,444	11	300	1680
11 2	11,000	11	14 ² /175	1280

§1.3 固定子巻線

1.3.1 固定子巻線の種類

固定子巻線として今日最も多く採用されているのは二層、分相、重ね巻である。固定子巻線の種類を分類すると

1. 単層巻と二層巻……………1個の溝に線輪片1個が納められた場合で単層巻、

2個重ねて納められた場合が二層巻である。

2. 全節巻と短節巻 線輪間隔が極間隔に等しいものを全節巻と称し、極間隔より小さい場合を短節巻と称す。主に短節巻が採用されている。

3. 集中巻と分布巻 1極1相の溝数が1個の巻線と集中巻、2個以上のものを分布巻と称す。一般には分布巻が採用されている。

4. 重ね巻、鎖巻と波巻 主として重ね巻が採用されている。鎖巻は小型で古い発電機に見受けられる。次第に重ね巻に改造されている。

5. 整数溝巻と分数溝巻 毎極毎相の溝数が等しいものを整数溝巻といい、溝数が2種類ある場合を分数溝巻という。

となる。

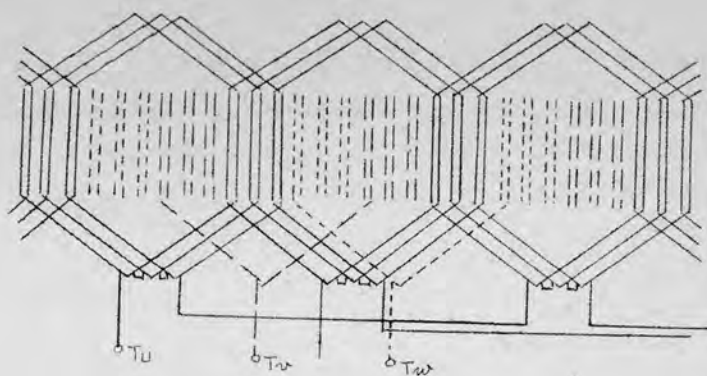
鎖巻は単層巻のみであって、一般には全節巻、整数溝巻である。二層巻には重ね巻、分布巻が主として採用され、全節巻、短節巻いずれでもよく、また整数溝巻、分数溝巻いずれも適用することができる。波巻は特殊な場合であって、交流発電機の巻線にはほとんど用いられていない。

巻線法の一列を展開図により図示すると、第1.11図は二重巻、重ね巻、全節巻、整数溝巻の巻線法、第1.12図は二層重ね巻、分数巻の巻線法、第1.13図は単層巻、鎖巻の巻線法である。

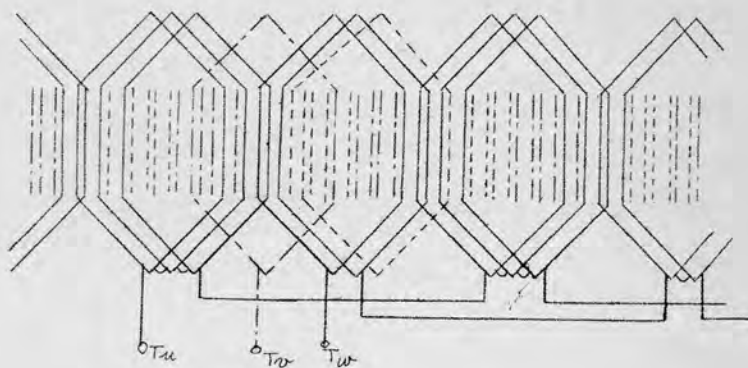
二層、整数巻は毎極毎相の溝数が整数で、第1.11図に示す如く、同一層内に同相の線輪が上下になって納まっている。二層、分数溝巻は毎極毎相の溝数が整数とならないもので、第1.11図に示す如く、同一相の各極毎の溝数がすべて同一でなく、一部の極における溝数が異なる場合である。この場合にはある溝においては相の異なる線輪が上下に納まることになる。単層巻は第1.13図に示す如く、一つの溝に一つの線輪導体が納められるので、線輪の溝部においてはそれぞれの線輪が静電的には遮蔽された状態である。二層、整数巻の場合は線輪端部および渡り線は別として、線輪導線は溝内において他相線輪よりの静電的な結合はないが、同相線輪間における結合がある。二層、分数溝巻においては他相ならびに同相線輪との結合がある。巻線は線輪端部および渡り線においては単層巻、二層巻の別なく他相および同相導体がある空間と絶縁物とにより絶縁されているのみであるからそれぞれの間には静電、電磁的結合があるものと考えられる。

1.3.2 極間接続法

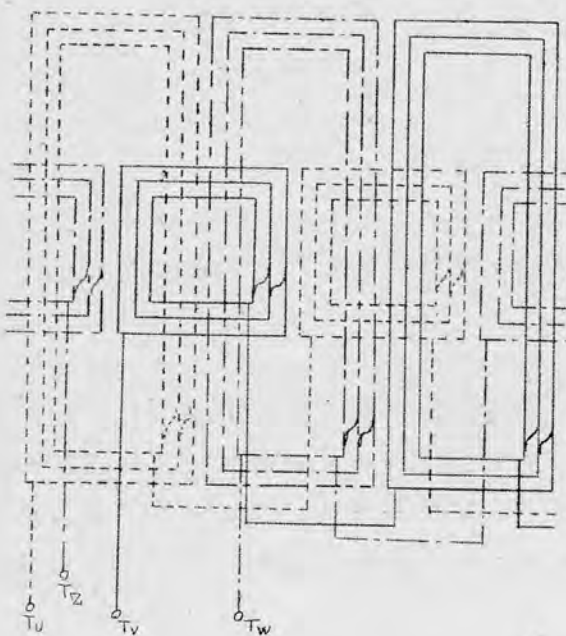
三相交流発電機では幾つかの極が並列に接される場合があり、この最大並列回路数は二重巻では極数と同じであるが、単層巻では極数の半分となる。この並列接続法には隣極直列接続法と隔極直列接続法の二通りがある。第1.14図が隣極直列接続法で順次隣りの極を直列に接続するものである。第1.15図が隔



第1.11圖 二層重疊卷, 全節卷, 整數薄卷

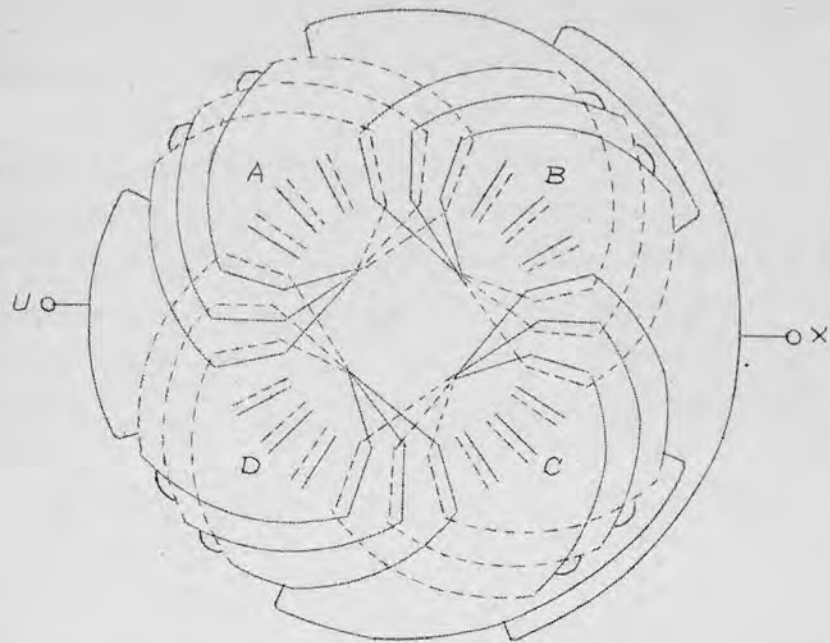


第1.12圖 二層重疊卷, 分數薄卷

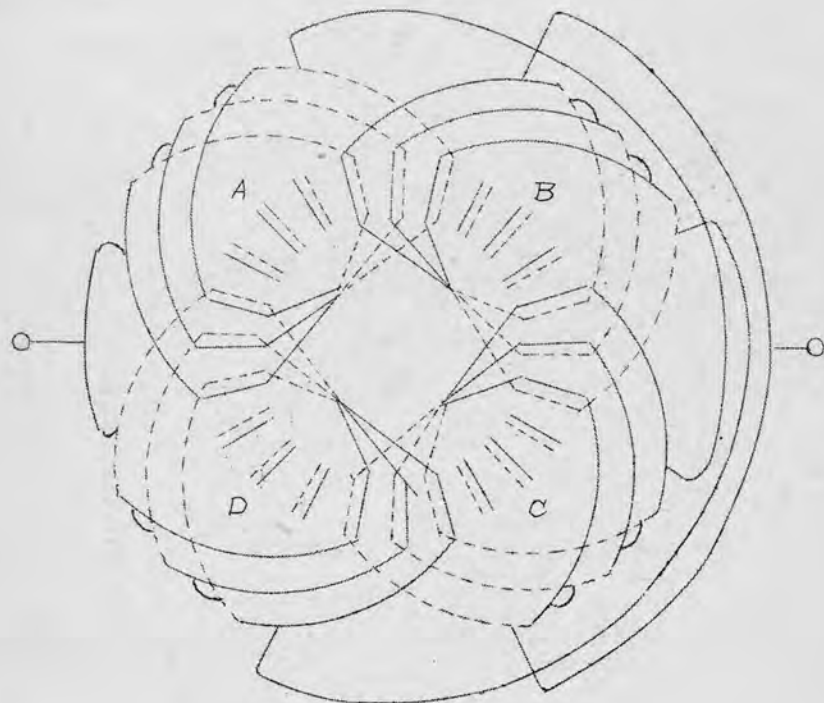


第1.13圖 單層鎖形卷

極直列接続法で、数枚飛んだ極を直列に接続するものである。普通は一極を隔てて接続されている。この接続法が異なることは電磁波の侵入に対し、巻線における位相および同相間の静電的、電磁的結合が時間的に相違することになる。



第 1.14 図 隣極直列接続



第 1.15 図 隔極直列接続

§1.4 供試発電機

供試発電機はその容量が40kVAから25,000kVAまでのもので、定格電圧は3,300V, 6,600V, 11,000Vである。台数は17台である。

これら17台の供試機の構造の概要を第1.6表に示した。

供試発電機は回転子が凸極型で原動機は水車である。その内2,800kVA, 20,000kVA, 11,000kVAは制動巻線を有している。また400kVA, 40kVAの二台は模擬制動巻線を附して実験を行った。

巻線方式から供試発電機を分類すると、単層鎖形巻の発電機は神崎川発電所3,500V, 720kVA, 内山発電所6,600V, 1,500kVA, 白糸発電所3,450V, 400kVAである。他の発電機は二層、重ね巻発電機で、巨神発電所3,500V, 4,500kVAは遊び線輪を有している発電機で、今日ではかように遊び線輪を有する発電機の設計は行われていないものとする。

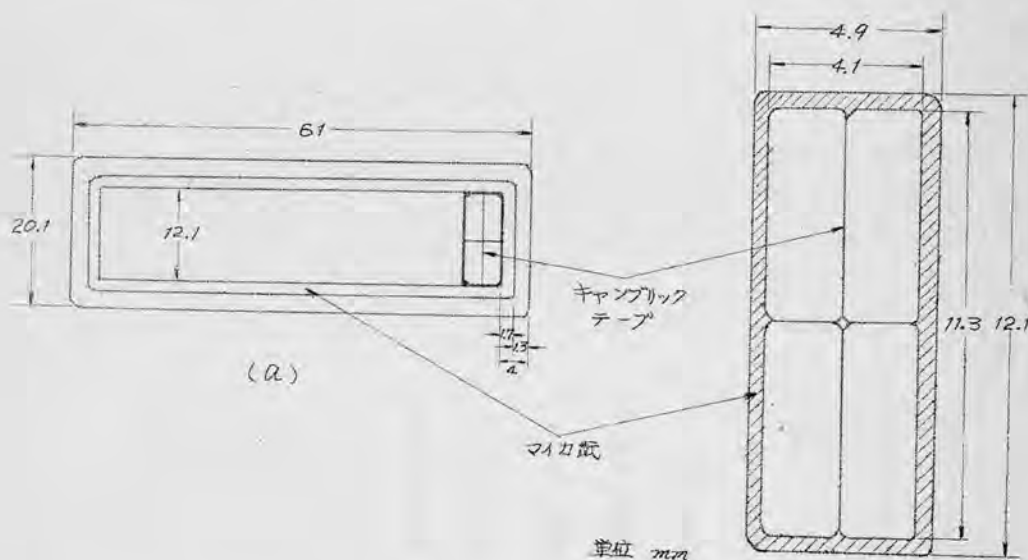
供試発電機線輪の絶縁仕様と巻線の展開図を各発電機毎に述べることにするが、ただここで一言断っておきたいのは、供試発電機の中には製作年代が古く絶縁仕様の不明のものもあることである。

1.4.1 4,375kVA, 12kV 発電機

当該線輪の断面図を示したのが第1.16図で、(a)図は断面、(b)図は巻回間の絶縁を明示するために拡大したものである。絶縁仕様を述べると下記の通りである。

巻回間絶縁は線輪の直線部分においては0.076mmマイカ紙1/2重巻2回、線輪端部においては0.13mmガステープ1/2重巻1回である。

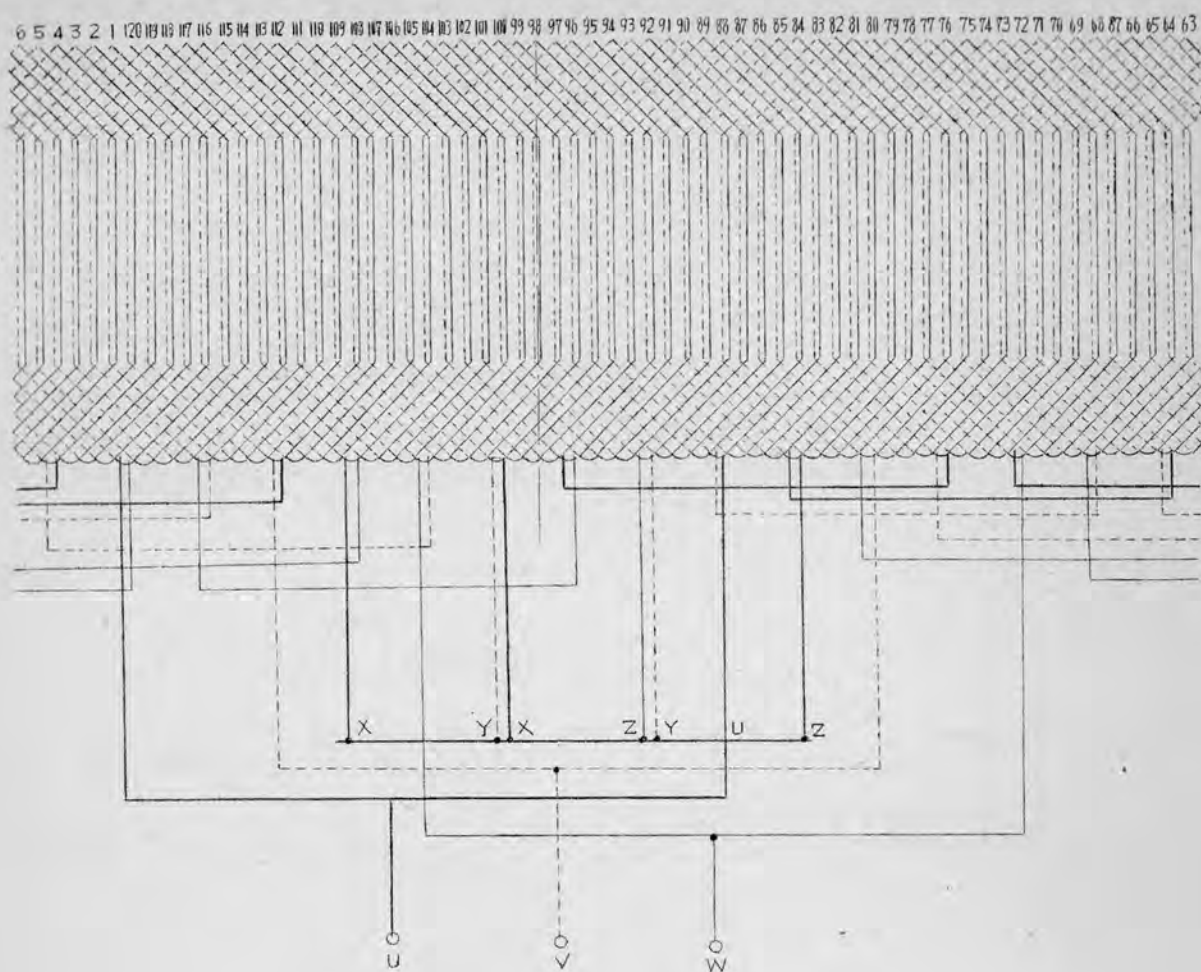
対地絶縁の絶縁仕様は最初線輪をワニス処理し、加熱圧縮成形し、線輪の直線部は0.13mmマイカ紙、1/2重巻6回、その上に0.18mm絶縁布1/2重巻4回、線輪端部は0.16mm絶縁布を直線部との急激な変化をつけないようにしてワニス処理



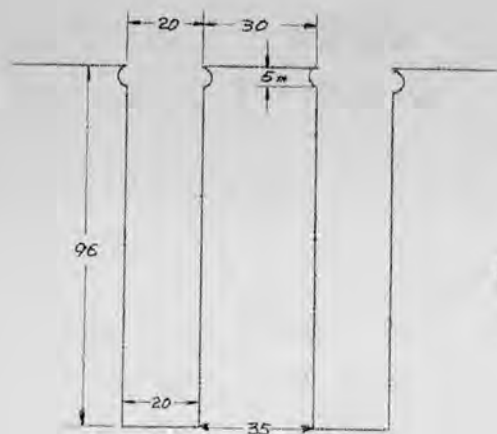
第 1.16 図

第 1.5 表 供試発電機の概要

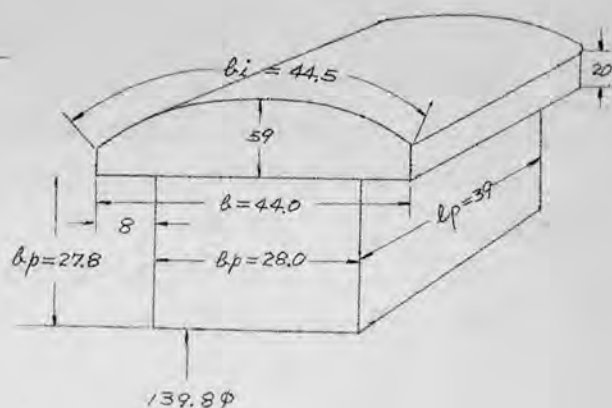
供試番号	発電所名	発電機容量 (kVA)	定格電圧 (V)	周波数 (Hz)	極 数	回転数 (R.P.M.)	巻線方式	一相当り の回路数	巻 回 数 (回)	一相分の 線路本数	線 路 長 (m)	鉄心の 長さ (cm)		制動巻線 の有無
1	今井発電所	4,375	12,000	50	10	600	二層, 重ね巻, 短節巻	2Y	11	40	30.8	—	横軸	無
2	小松発電所 (1G)	4,800	6,600	50	10	600	二層, 重ね巻, 分数溝 分相, 短節巻	2Y	5	44	16.5	50.5	縦軸	無
3	小松発電所 (4G)	4,800	6,600	50	10	600	〃	2Y	5	44	16.5	50.5	縦軸	無
4	御岳発電所	25,000	11,000	50/60	12	500/600	重ね巻, 整数溝巻	4Y	6	48	28.2	120	縦軸	無
5	昼神発電所	4,500	3,500	60	10	720	二層, 重ね巻, 分数 溝巻	2Y	7	44	—	—	横軸	無
6	面河第一発電所	4,375	6,600	60	12	600	二層, 重ね巻, 分相, 短節巻	2Y	7	36	20.0	55	縦軸	無
7	神崎川発電所	720	3,500	60	12	600	単層, 鎖形巻	1Y	6	18	大 15.8 中 14.7 小 12.6	—	横軸	無
8	笠置発電所	15,000	11,000	60	48	150	二層, 重ね巻	3Y	4	120	14.4	1.0	縦軸	無
9	神崎川発電所	1,200	3,500	60	12	600	二層, 重ね巻	—	—	—	—	—	横軸	有
10	内山発電所	1,500	6,600	60	12	600	単層, 鎖形巻	1Y	8	24	—	—	横軸	無
11	川又保発電所	2,800	3,450	50	8	750	二層, 重ね巻, 分数 溝巻	2Y	—	28	—	56.0	横軸	有
12	水内発電所 (2G)	10,000	11,000	50/60	42	143/171.5	二層 重ね巻, 分数溝巻	2Y	5	96	—	—	縦軸	無
13	白糸発電所	400	3,450	60	16	450	単層, 鎖形巻	1Y	16	16	—	—	横軸	無
14	新改発電所	1,000	11,000	60	10	720	二層, 重ね巻, 分相, 短節巻	1Y	12	30	24	45	横軸	無
15	宮下発電所	20,000	11,000	50	36	167	二層, 重ね巻, 整数溝 分相, 短節巻	2Y	2	108	6.84	82	縦軸	有
16	水内発電所 (1G)	11,000	11,000	50/60	42	143/171.5	二層, 重ね巻	2Y	5	96	—	—	縦軸	有
17	—	40	3,300	50	8	750	二層, 重ね巻	1Y	不明	24	—	13	横軸	無



第1.17图 12_{kV}.4375_{kVA} 卷線展开图

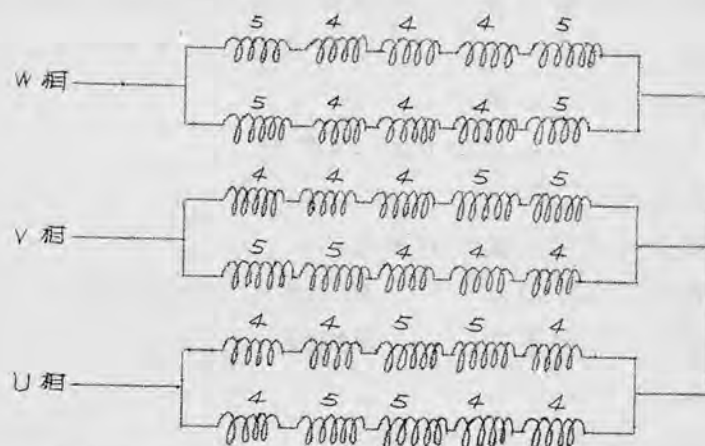


第1.19図 溝部の寸法



第1.20図 磁極の構造

当該発電機巻線方式は二層、重ね巻、短節巻、分岐溝巻であり、かつ二重Y結線で極接続である。各相巻線の各極の線輪数をわかり易く示したのが第1.21図である。なお巻線の展開図は持ち合わせていない。



第1.21図 各相巻線の各極における線輪の配置図

1.4.3 25,000 kVA, 11 kV 発電機

当該発電機の線輪絶縁仕様は不明である。固定子巻線の結線図を第1.22図に示す。当該発電機を使用して発電機の巻回間短絡用保護継電器の試験を実施した。そのとき同相間の4つの分岐巻線の不平衡をなくするため第1.22図の如く一部接続変更を行ったので衝撃電圧試験はそのままの状態で行った。

巻線の配置は第1.22図より知る通り、同相の4つの分岐巻線が固定子を4分割してそれぞれ配置され、1分岐線の線輪数は12本である。接続法は隣極接続法、毎極毎相の溝数は4でそのうち2つの溝には同相巻線の線輪が上コイル、下コイルとなって納まっている。

当該発電機の定格は次の通りである。

容量	2,500 kVA	電圧	11,000 V
周波数	50/60	極数	12 極

回 転 数 500/600

線輪総数 144本

巻 回 数 6ターン

4重星形結線

1.4.4 4,500 kVA, 3.5 kV 発電機

当該発電機の絶縁仕様については不明である。定格仕様については第1.6表に掲げているが、次の通りである。

型 式 横軸回転界磁閉鎖通風型

容 量 4,500 kVA

極 数 10極

電 圧 3,500 V

周波数 60 Hz

力 率 80%

回 転 数 720 r.p.m

定 格 比 0.795

結 線 法 二重星型

固定子巻線の結線図を第1.23図に示す。当該発電機は線輪総数132本中18本が遊び線輪となって分散されている。二重星形結線を採用して同相の内一つの巻線は半周して巻かれ、他の巻線は前者の中点点になっている極の次の極より始まって半周している。接続法は隣極接続法を採用しており分数溝巻である。二つの分岐巻線の間の結合は一つの巻線の最初の線輪と他の巻線の最後の線輪の換輪導線が同一溝に納っていて、この箇所での結合があるのみで他の線輪においては電磁結合があるが弱い。

1.4.5 6,600 V, 4,375 kVA 発電機

1. 発電機の仕様

発電機の仕様は下記の通りである。

電 圧 6,600 V

容 量 4,375 kVA

力 率 80%

結 線 二重星形

総線輪数 108本

極 数 12

巻回数 7

2. 巻線方式

当該発電機は二層、重ね巻、短節巻、整数溝巻で隣極接続法を採用している。線輪の配置は第1.24図の固定子巻線の展開図より、一相分の巻線は二つの並列巻線がなり、毎極、毎相の溝数は3で、同相の線輪が同一溝内に上コイル、下コイルとなって納っている。

3. 線輪の絶縁方式

当該発電機線輪の絶縁方式は詳細にわからぬが、大体第1.25図に示す通りである。

1.4.6 720 kVA, 3.5 kV 発電機

当該発電機の絶縁仕様は不明である。巻線の展開図は第1.26図である。溝数は108で単極鎖形巻、12極の発電機であるので毎極毎相の溝数は3である。

当該発電機の溝は半閉溝であるが、その寸法は不明である。発電機の定格は下記の通りである。

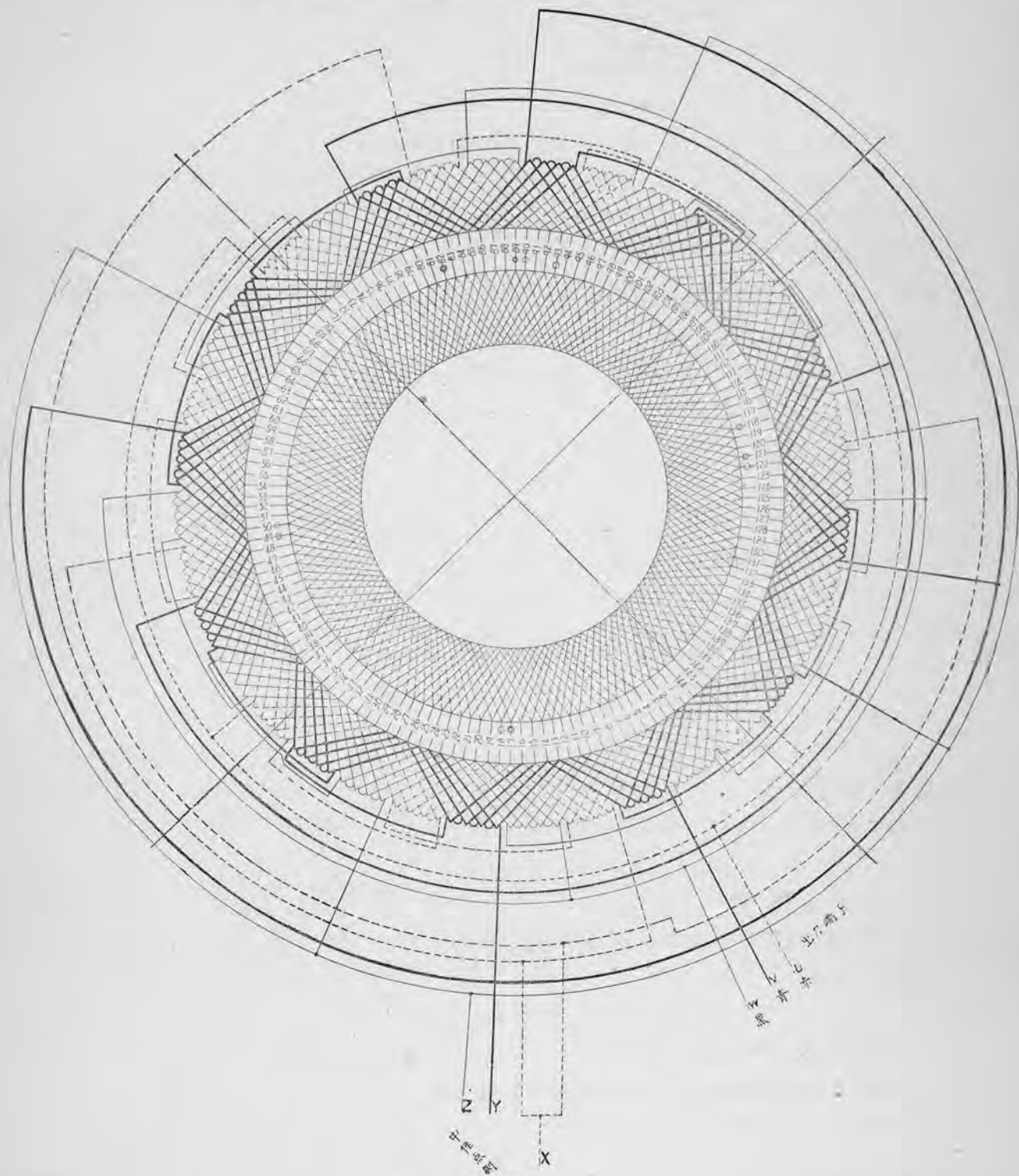
容 量 720 kVA

電 圧 3,500 V

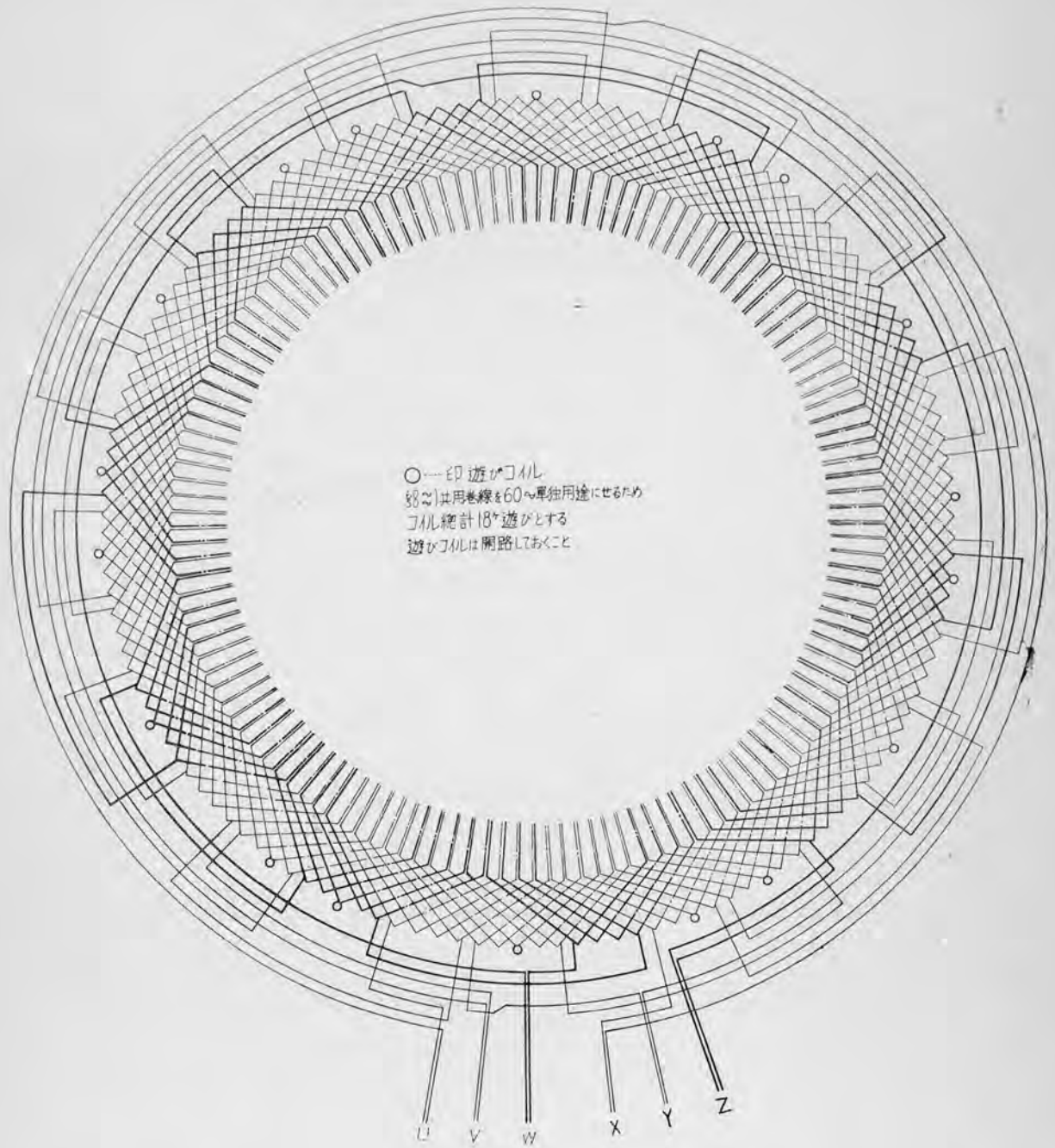
周波数 60 Hz

極 数 12極

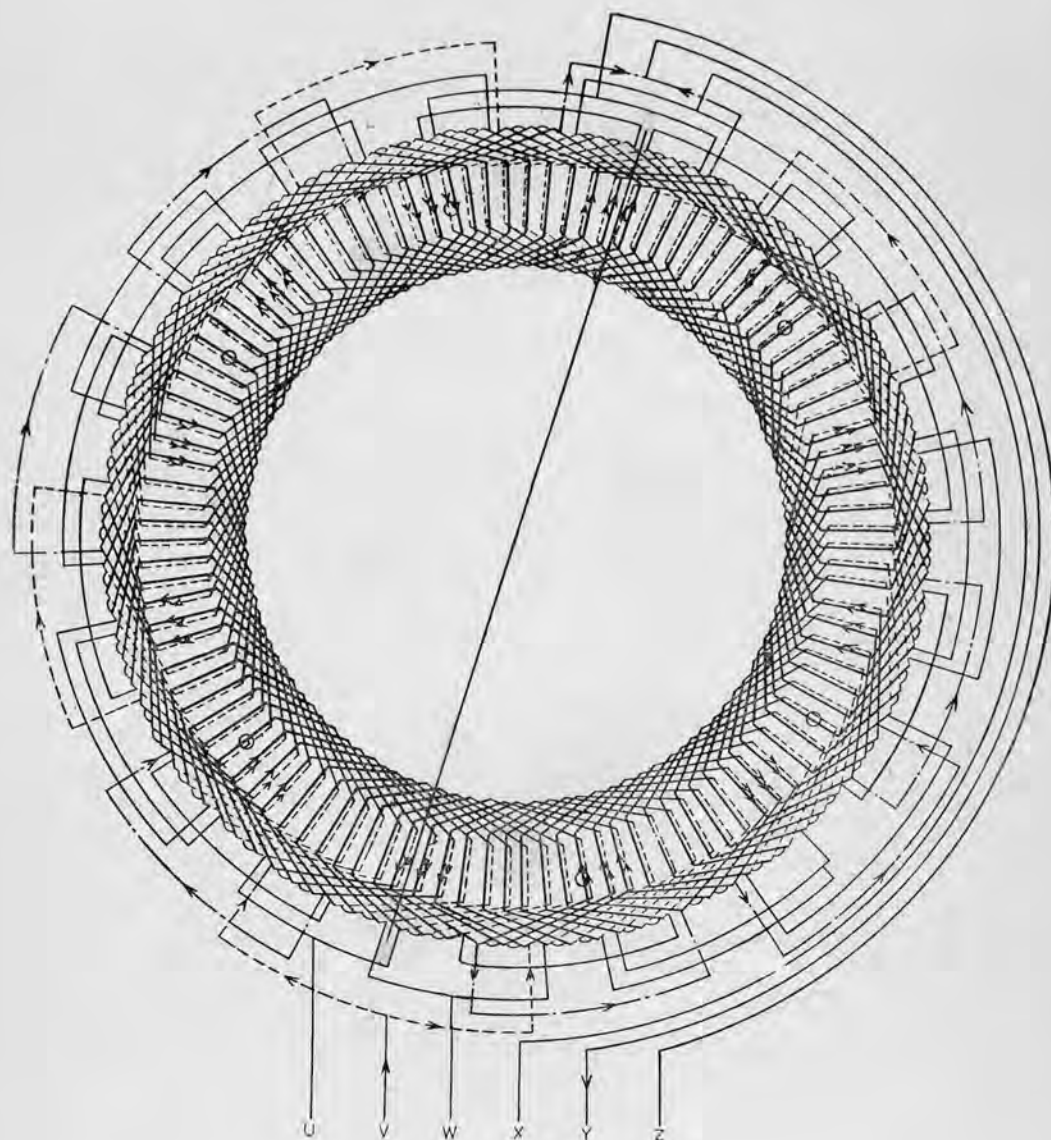
第 1.21 图 25,000kVA 发电机定子绕组接线图

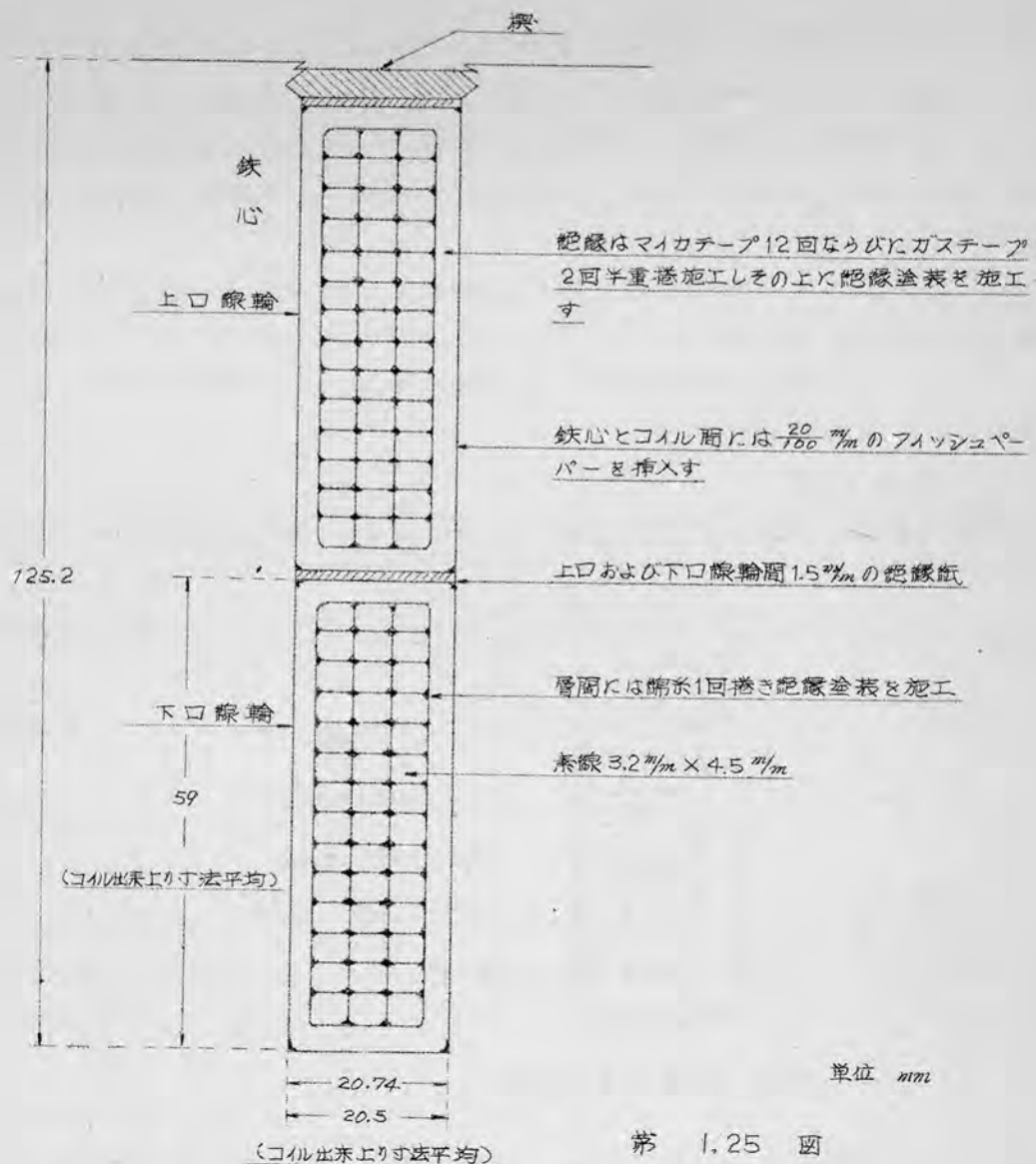


第 1.23 図 4,500kVA 発電機巻線結線図



第 1.24 図 4,375 kVA 固定子巻線の結線図





回転数 600

巻回数 6ターン

一重星形結線

実測時の回転子磁極と固定子線輪（溝）との相対的位置は第1.26図に示す通りでU相3本、V相3本、W相1本が磁極と対して位置している。

1.4.7 11,000 V, 15,000 kVA 発電機

1. 発電機の足格および仕様

相数	3	容量	15,000 kVA
定格電圧	11,000 V	電流	787 A
回転数	150 R.P.M	極数	48
力率	0.8	全溝数	360

2. 巻線方式

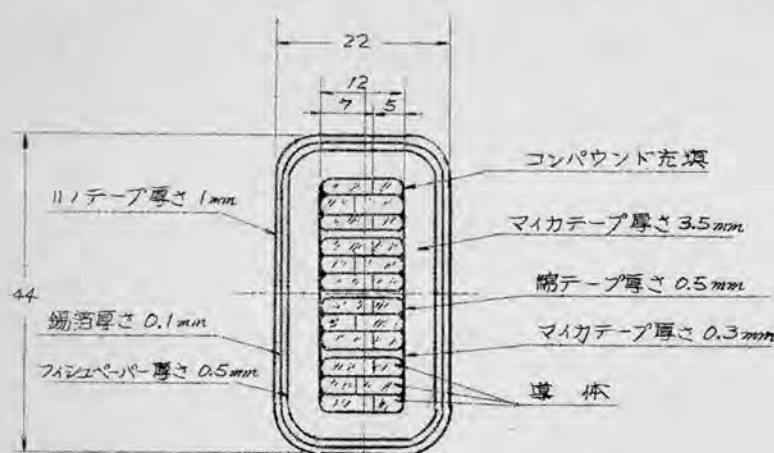
当該発電機は二層、重ね巻、分数溝巻である。接続法としては隣極接続法を採用している。各相巻線の配置状態は第1.27図の展開図より知ることがで

きる。この展開図より当該発電機巻線の配置の主な点は次の通りである。

- (1) 各相は三分岐巻線を持ち、固定子を3分して配置されている。
- (2) U_1 巻線の出力端子より3番目の線輪と U_2 巻線の中性点側より1番目の線輪とが同一溝内に納まっている。 V_1 巻線と V_2 巻線、 W_1 巻線と W_2 巻線においても同様である。
- (3) U_2 巻線の出力端子より3番目の線輪と U_3 巻線の出力端子より2番目の線輪とが同一溝に納まっている。 V 相、 W 相においても同様である。
- (4) U_1 、 U_3 巻線の中性点側より1番目の線輪が同一溝に納まっている。 V 相、 W 相においても同様である。

3. 絶縁仕様

線輪の溝部における断面図を第1.28図に示す。溝部の絶縁仕様は第1.28図に



第1.28図 溝内の線輪断面

記入してある通りで、これ以上詳細なことは不明である。

(1) 系線絶縁は不明

(2) 巻回間絶縁はマイカテープそれぞれ0.3の厚さに施行しているため巻回間としては0.6 mmの絶縁となる。

(3) 対地絶縁の寸法は、巻回間絶縁としての0.3 mm、線輪下葎として綿テープを施行し、その寸法0.5 mm、その上にマイカテープを施行し、その厚さ3.5 mm、さらにフィッシュペーパー厚さ0.5 mmであるので合計の厚さは4.8 mmである。

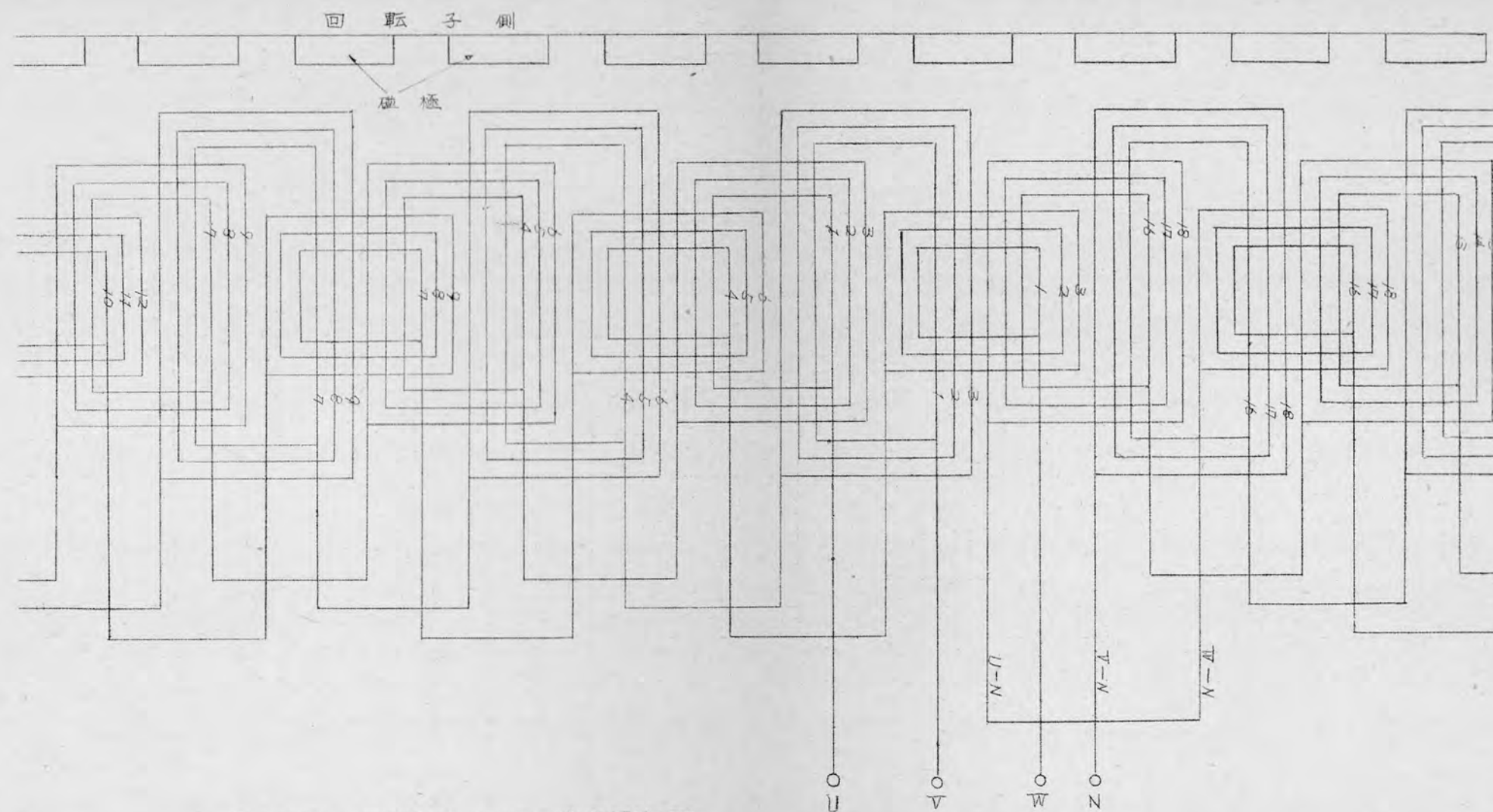
(4) 当該線輪は第1.28図に示している通り錫箔を巻いて、溝部において生じるコロナを抑制している。

(5) 線輪端部は線輪下葎までは溝部と同一の絶縁であるがその次の絶縁としてマイカテープ厚さ2.8 mm、その上にリノテープ厚さ2.5 mmを施行している。

1.4.8 6,600V, 1,500 kVA 発電機の仕様

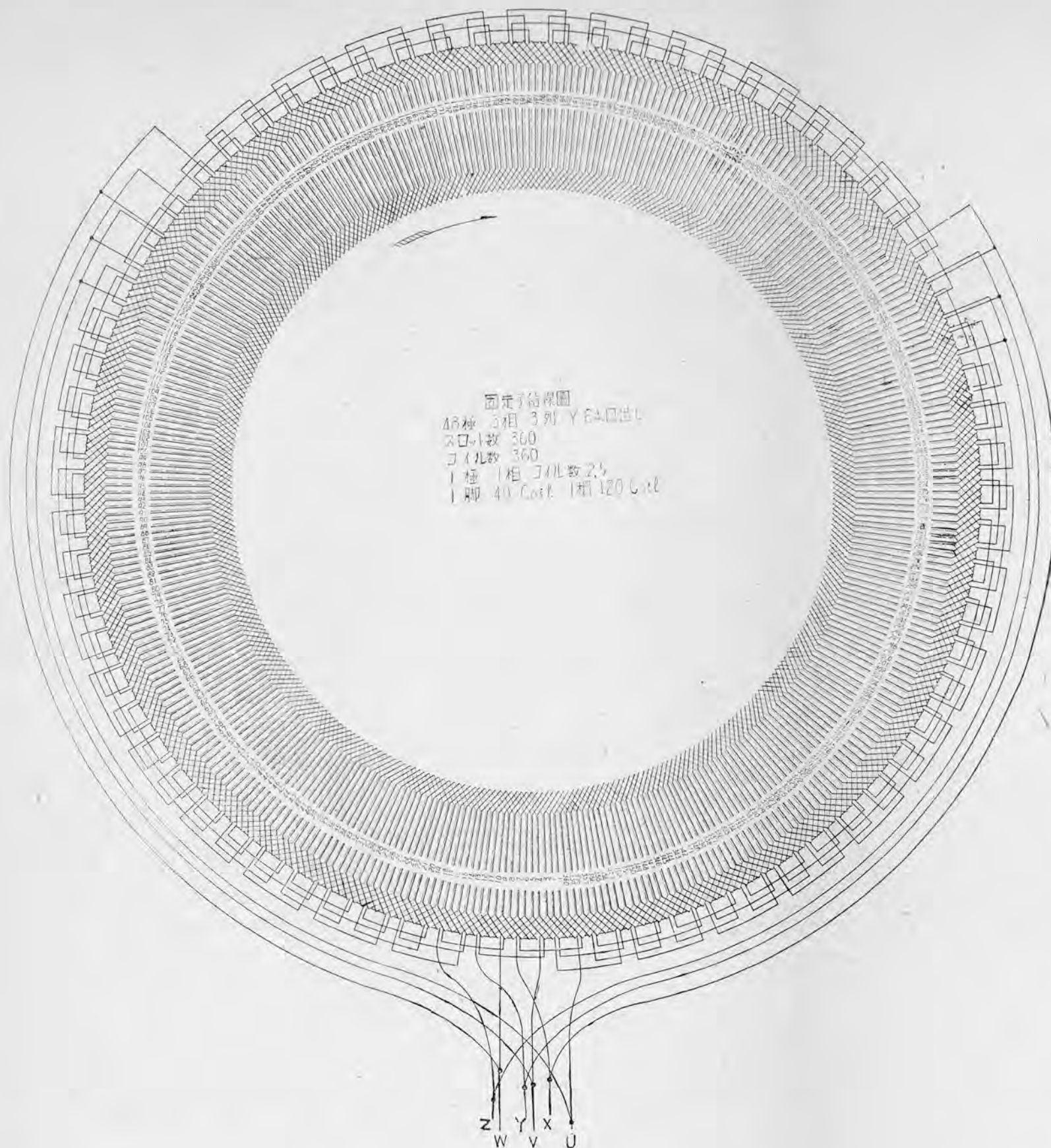
1. 発電機の定格

容量	1,500 kVA	電 圧	6,600 V
電 流	131 A	力 率	86 %
周 波 数	50 ϕ	極 数	12
接 続	一重Y	台 数	3 台
製造年月	大正7年		



第1.26図 720kVA, 3500V 巻線展開図

第 1.27 図 15,000kvA 発電機巻線展開図



2. 巻線方式および線輪の構造

総線輪数 72

溝数 144

極数 12

鎖形巻、単層巻 8ターン

全節巻

分配係数 0.958

溝数/毎相/毎極 4

総線輪組数/毎相 6

総線輪/毎相 24

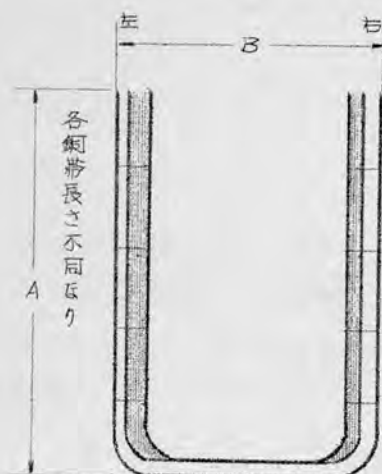
導体

幅 11mm, 厚さ 5.5mm, 1本

幅 ¾吋, 厚さ 0.13mm, ガステープ ½, ラップ 1回巻

線輪浸潤ワニス塗布

線輪は4種類があって、その寸法は第1.29図の線輪の構造に基づいて寸法を示したのが第1.7表である。



第1.7表 寸法表

コイル	A	B
1	790 ~ 1,100	428
2	850 ~ 1,090	505
3	905 ~ 1,450	597
4	960 ~ 1,365	670

第1.29図

1相分の巻線の豆長は第1.7表より求めると693mである。

固定子線輪の配置を示したのが第1.30図である。

3. 絶縁仕様

○層間絶縁

幅 12mm 厚さ 0.5mm プレスボード 2枚 あるいは

幅 12mm 厚さ 1.0mm プレスボード 1枚

○対地絶縁

溝部——マイカチューブ 1本

終端部——幅 1吋 厚さ 0.13mm エンパイヤチューブ ½ ラップ 2回

最外部——幅 1吋 厚さ 0.13mm ガステープ ½ ラップ 1回

大正4年予備コイル入替えその後焼損事故なし。

温度最高60℃(推定)で振動がほとんどない。

使用年限が長くなったので巻替を行うことになった線輪である。

Technical drawing of a mechanical part, likely a mold or die, showing dimensions and labels.

Dimensions (mm):

- Top left: 20
- Top middle: 21
- Top right: 15
- Left side (vertical): 72.5
- Right side (vertical): 89
- Right side (vertical): 64
- Bottom left: 3
- Bottom middle: 38
- Bottom right: 1
- Bottom center: 35

Labels:

- スロット数 四 (Slot count: Four)
- マイカチユープ (Mica chip)

Formula:

$$r = 947.5$$

4. 固定子溝

1.4.9 2,800 kVA, 3,450 V 発電機

1.4.10 11,000 V, 11,000 kVA 発電機の仕様

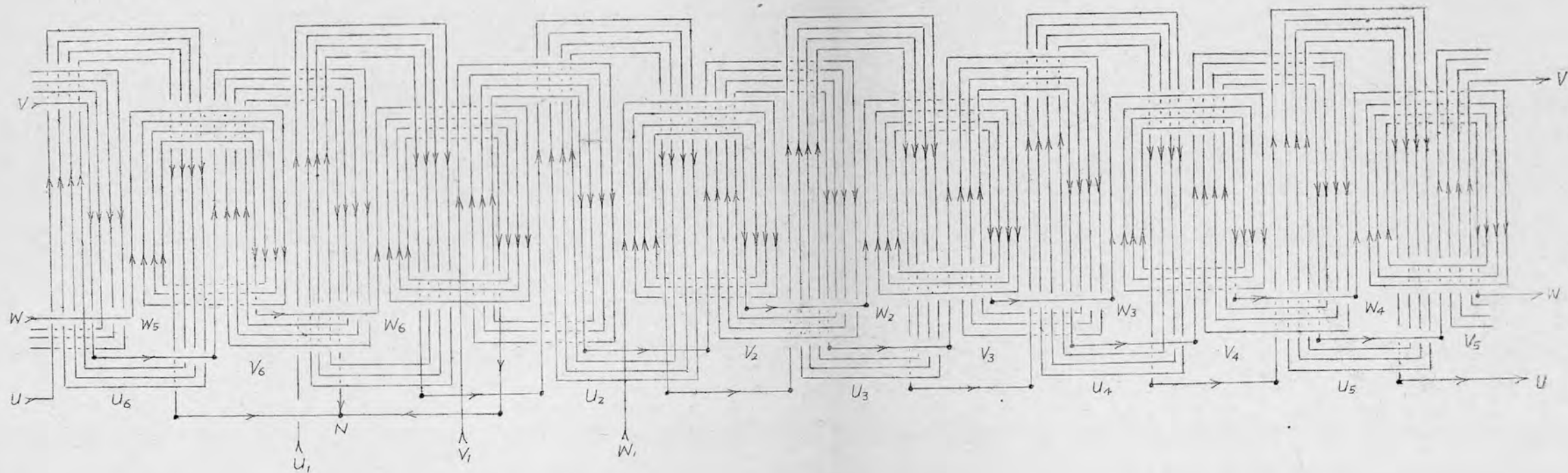
1. 発電機の仕様

電 壓	11,000 V	容 量	11,000 kVA
力 率	85 %	回 轉 數	143 (171.5)
周 波 數	50 (60)	結 線	二重星形
極 數	48	卷 回 數	5

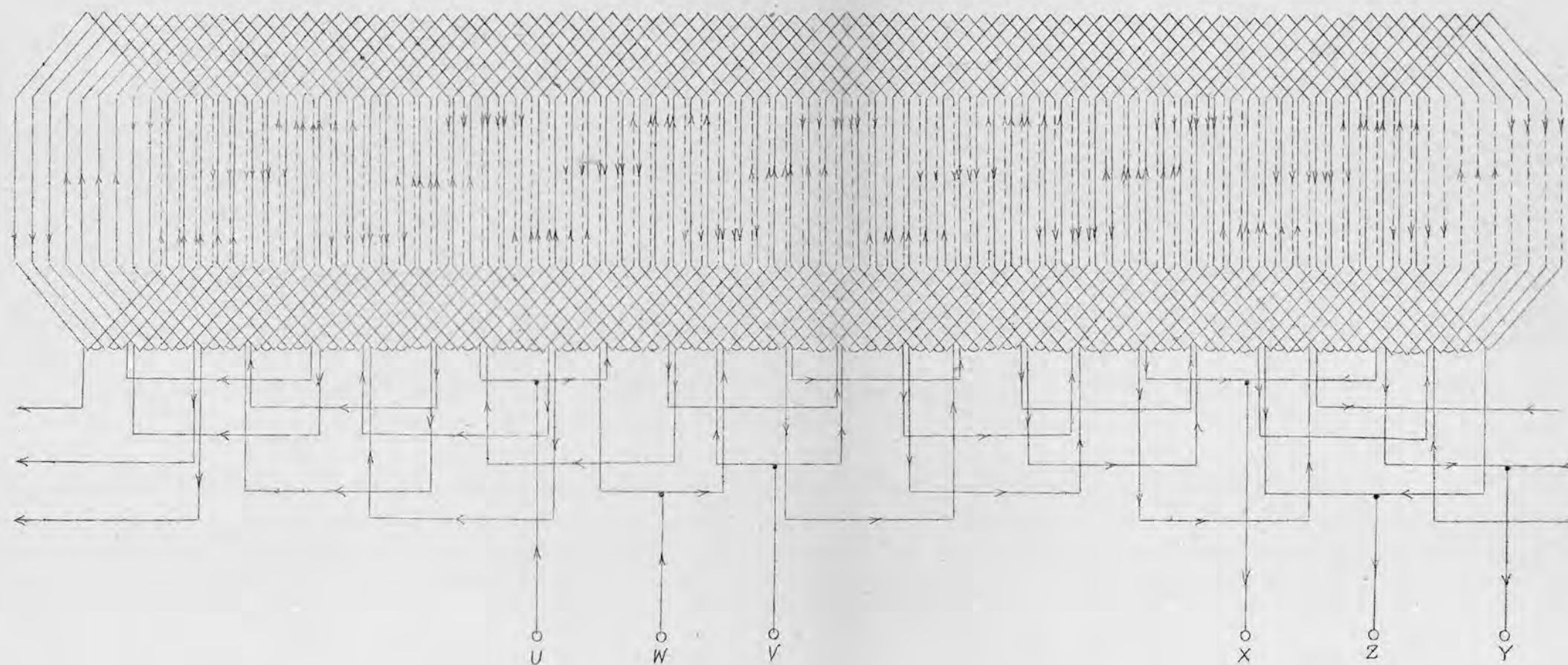
2. 卷線方式

二層巻、重ね巻、分敷溝巻で、隔極接離法を採用している。巻線の展開図は第1.33図に示した。全溝数は288である。

(26)



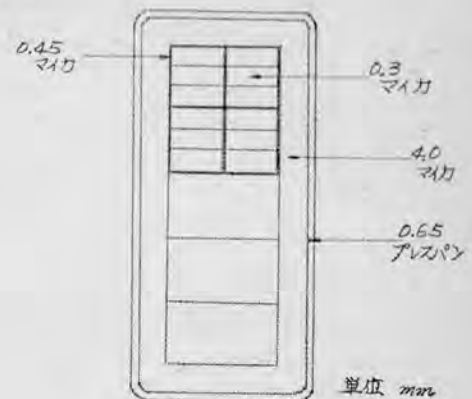
第 1.30 图 6,600 V, 1,500 kVA 卷線展開圖



第1.32図 2800 kVA, 3.5 kV, 固定子巻線展開図

3. 絶縁仕様

絶縁仕様は詳細にはわかっていないがB種絶縁で、大体の様子は第1.34図に示した線輪断面図に記入している。昭和18年製の発電機は昭和28年1月30日に第1回目の巻回間絶縁の破壊により焼損事故を惹起し、同年2月、3月、5月、6月、7月と焼損事故を起し、8月に線輪全巻替えを行った。



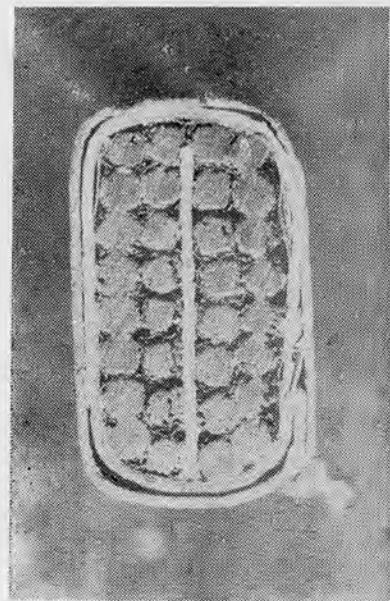
第1.34図 線輪断面図

1.4.11 3,450V, 400kVA 発電機

1. 発電機の定格

電 圧	3,450 V
電 流	67 A
容 量	400 kVA
周 波 数	60 ω
力 率	0.8
極 数	16
回 転 数	450 R.P.M.

当該発電機の巻線は単層巻、鎖形巻、一重星形結線で、一相分の線輪数は16本である。毎相/毎極の溝数は2である。

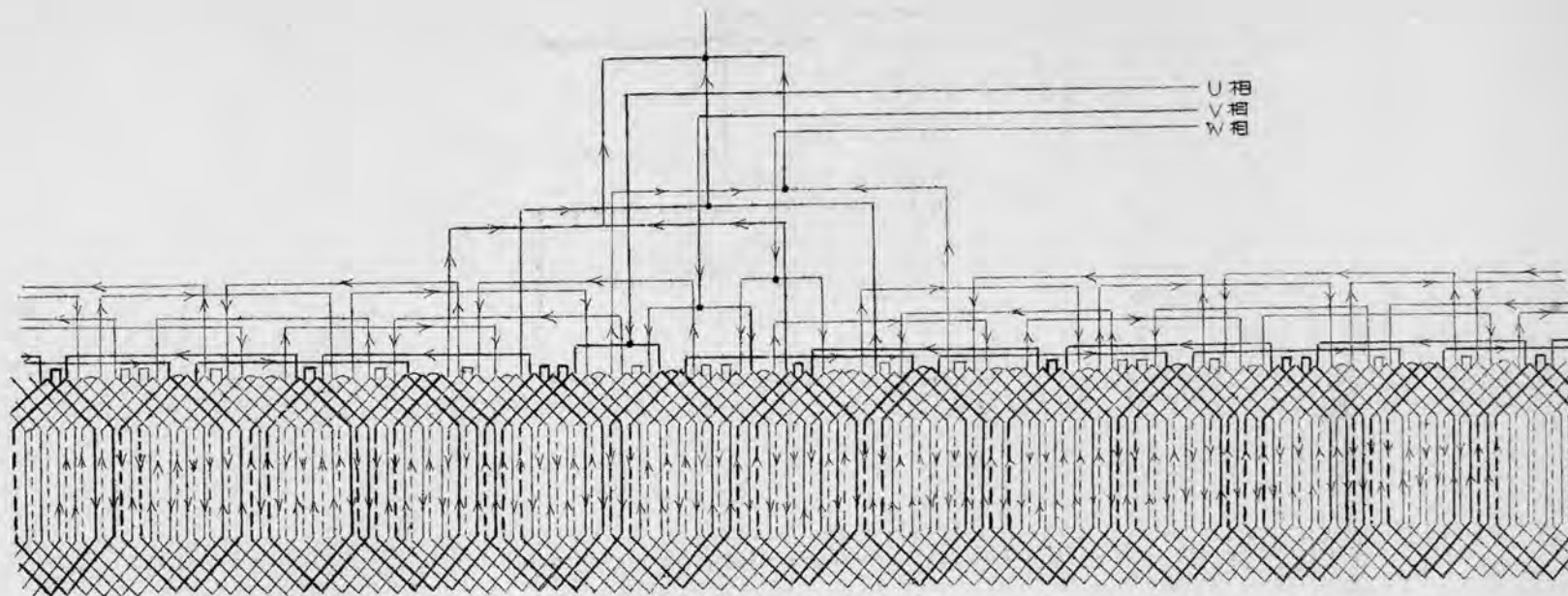


第1.35図 線輪の断面図

2. 線輪の構造と巻線方式

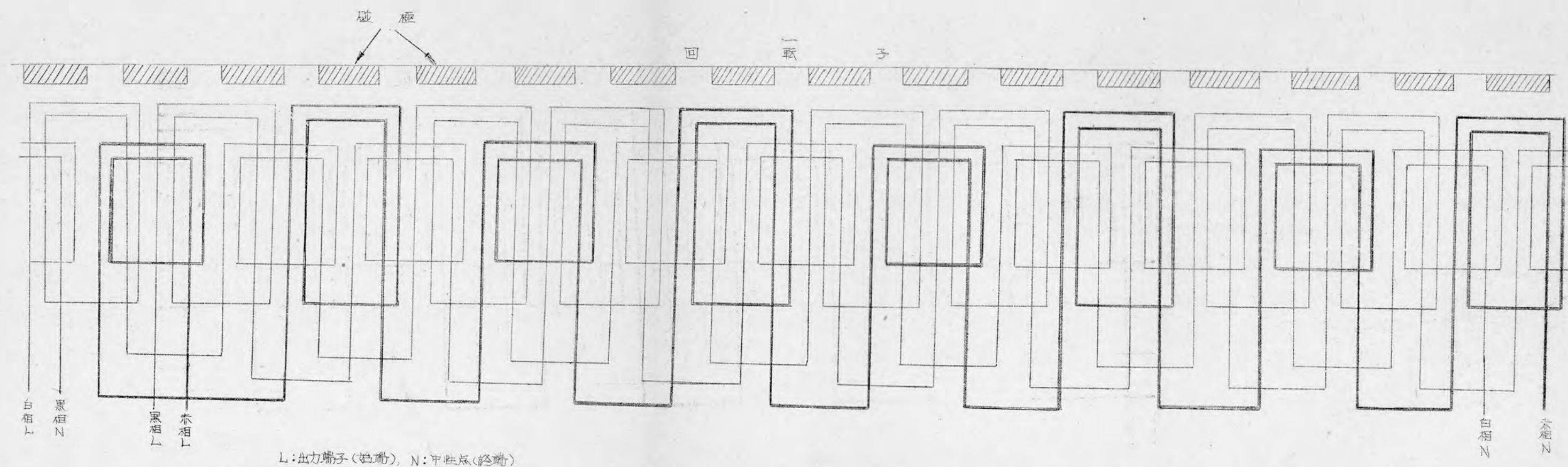
線輪は第1.35図の断面図の通りで、導体は25本燃りの撚線2本を使用している。巻回数は16回である。巻線方式は前述した通り単層巻、鎖形巻である。巻線の底面図は第1.36図に示した。

第1.35図の線輪の断面図から線輪の等価回路を示すと第1.37図となる。

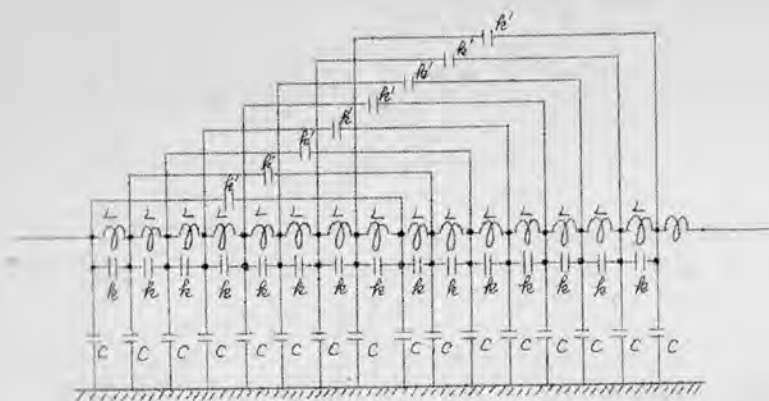


〔註〕 矢印は電流の方向を示す。

第134図 11000_V.11000_{kVA}巻線展開図



第1.36図 34500V, 400kVA 固定子巻線の展開図



第 1.37 図 線輪の等価回路

L : 1ターンの自己インダクタンス
 l : 巻回間の静電容量
 l' : 層間絶縁を通じた静電容量
 C : 1ターン導体の対地静電容量

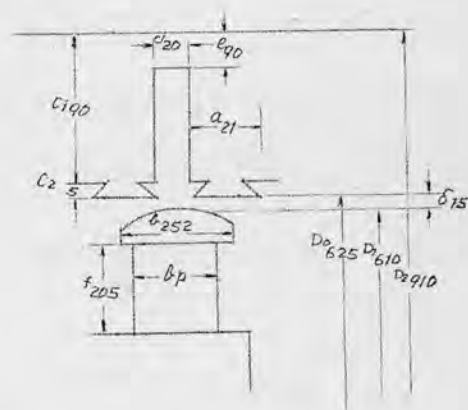
3. 絶縁方式

詳細にはわからぬがA種絶縁で、マイカ紙を対地絶縁に使用している。使用年数が長く、絶縁が劣化していると推定され、全替することになったものである。

1.4.12 11,000 V, 1,000 kVA 発電機

1. 発電機の仕様

電 圧	11,000 V
電 流	52.5 A
容 量	1,000 kVA
周 波 数	60 Hz
回 転 数	720 R.P.M
極 数	10
結 線	一重星形
線輪総数	90
巻 回 数	12



第 1.38 図

なお固定子の溝および歯の寸法、磁極の寸法および空隙寸法を示したものが第1.38図である。

2. 巻線方式

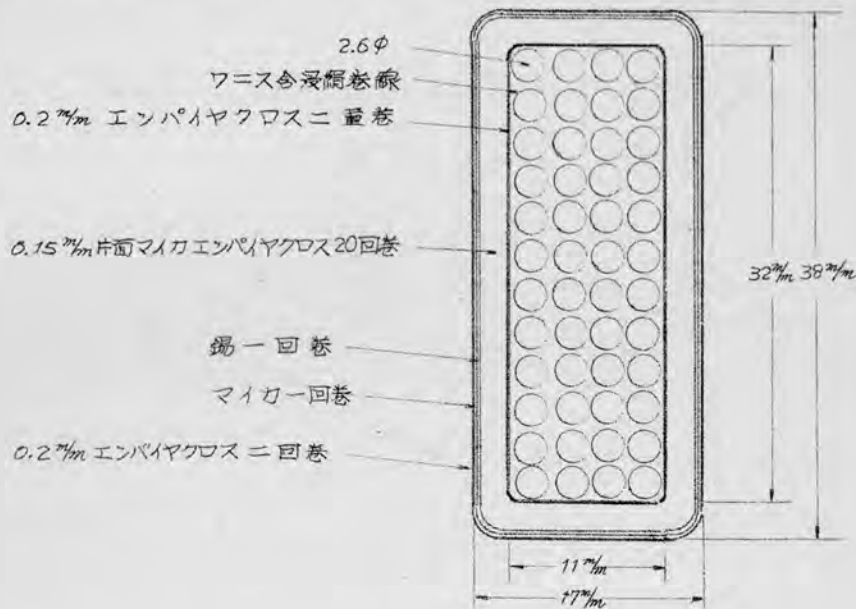
当該発電機は二層、重ね巻、短節巻で、隔極接続法を採用している。毎極毎相の溝数は3で線輪の配置は第1.39図の固定子巻線の展開図に示した通りである。この展開図より下記の点が特徴である。

- (1) 各相とも出力端子より1番目の線輪と16番目の線輪とが同一溝内に納まっている。
- (2) 各相とも出力端子より3番目の線輪と同相の最終端の線輪とが同一溝内に納まっている。
- (3) 4相の出力端子より2番目の線輪とV相の出力端子より1番目の線輪とが同一溝内に納まっている。V相とW相においても同様である。また中性点側

ではV相とU相，W相とV相とが同一状態になっている。

3. 線輪の絶縁方式

当該発電機線輪の絶縁方式は第1.46図に図示する通りで，A種絶縁である。



第 1.40 図

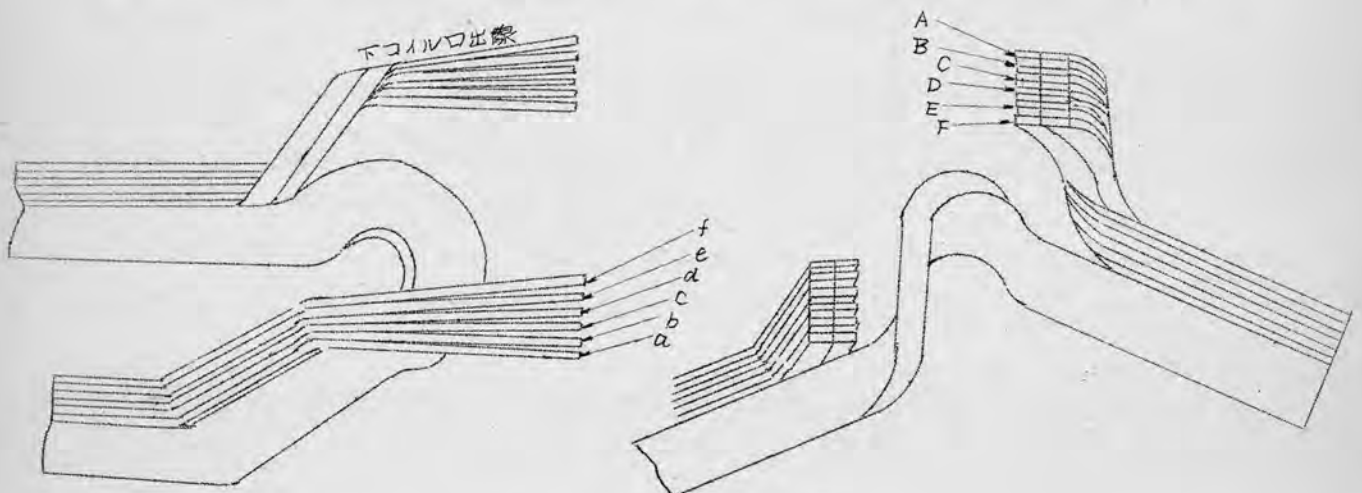
1.4.12 20,000 kVA, 11 kV 発電機

当該発電機の定格は下記の通りである。特に当該発電機は制動巻線を持っている。

容 量	20,000 kVA	電 圧	11,000 V
周 波 数	50 周	極 数	36 極
回 転 数	157	線輪総数	324 本

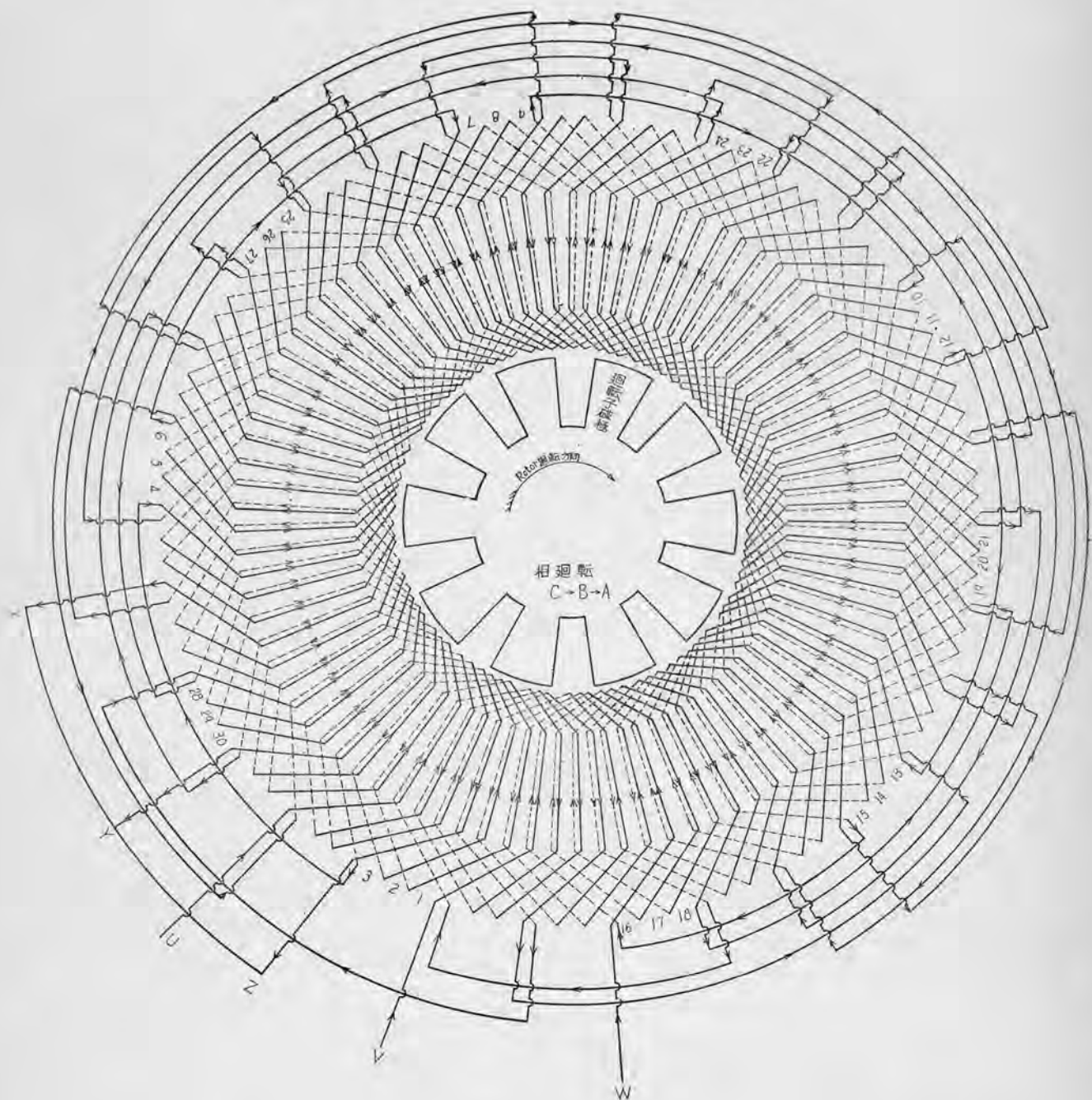
二重星形結線

当該発電機は容量が大きく，コイル口出線のところで燃っている。その模様



第1.41図 線輪口出し線

第 1.39 図 11,000v 1,000kVA 発電機固定子巻線図



を示したのが第1.41図である。素線は図にみるように12本の平角銅線を組んでいる。

固定子溝は開放溝で第1.42図に示す通りである。当該発電機固定子巻線の展開図を示したのが第1.43図である。二重星形結線で、隔極接続法、毎極、毎相の溝数は3で、左、右に向ってそれぞれのか岐巻線は巻かれ固定子を一周している。



第1.42図 固定子溝

1.4.13 3,300 V, 40 kVA 発電機

1. 発電機の定格

電 圧	3,300	電 流	7.4
容 量	40 kVA	周 波 数	50 ∞
回 転 数	750 R.P.M	極 数	8
溝 総 数	72	結 線	一重星形
巻 回 数			

2. 巻線方式

当該発電機は二層、重ね巻、短節巻で隔極接続法を採用している。線輪の配置は第1.44図の固定子巻線の展開図に図示した通りで、毎極、毎相の溝数は3である。この展開図より当該発電機の巻線は下記の特徴をもっている。

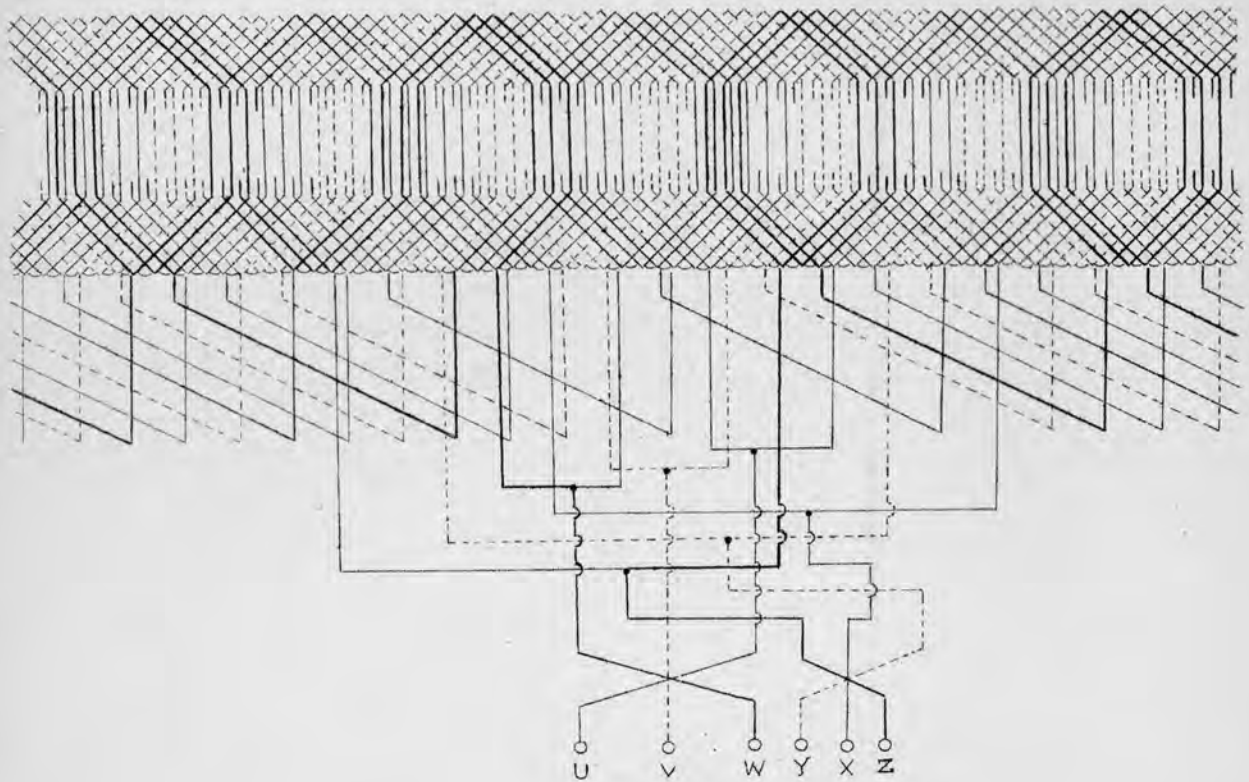
- (1) 各相とも出力端子より1番目の線輪と12番目の線輪とが同一溝に納まっている。
- (2) 各相とも出力端子より3番目の線輪と同相の最終端の線輪とが同一溝に納まっている。
- (3) U相の出力端子より2番目、3番目の線輪が、V相の出力端子より1番目、2番目の線輪とそれぞれ同一溝に納まっている。V相とW相においても同様である。

3. 線輪の絶縁方式

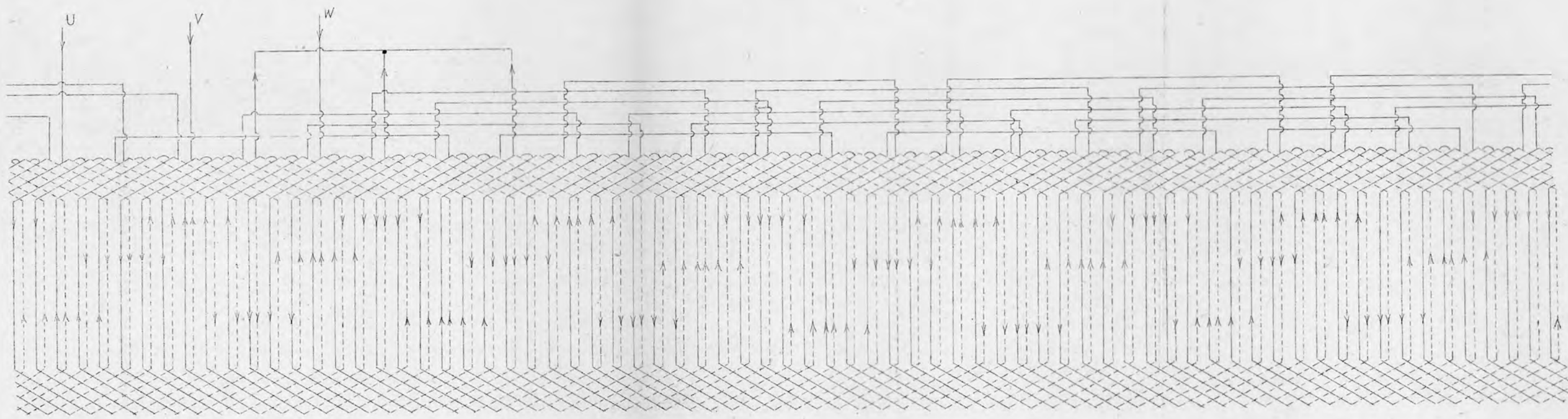
当該発電機はA種絶縁である。詳細な絶縁仕様については不明である。

4. 巻線の静電容量

巻線の静電容量を1,000 ∞ ブリッジ（第1, 2, 3項に示した）で測定した結果は第1.7表である。巻線のインダクタンスの値は、第6章第6.1表に示している。



第1.43図 11_{kV}, 20,000_{kVA} 固定子巻線層間図



矢印は電流の流れの方向

交流発電機

型式	T A F
相数	3
容量	40 KVA
電圧	3,300 V
電流	7 A
極数	8
周波数	50 ~
回転数	750 R.P.M

第 1.44 図 3.3 kV, 40 kVA 発電機展開図

各相の対地静電容量を C 、巻線間の静電容量を K とする。第1.7表の各相巻線の静電容量は僅か異なっているが、これを4,200 p.F、三相一括の時を7,800 p.Fとして、 C と K を求める。

$$3C = 7,800$$

$$C + 2K = 4,200$$

上の二式より $C = 2,600$ p.F, $K = 800$ p.F となる。

第 1.7 表

供試相	静電容量 (p.F)	他相の状態
U	4,220	接 地
V	4,180	〃
W	4,210	〃
三相一括	7,770	—
U-V	2,280	〃

〔註〕 接地は両端子の接地を意味する。

34 項欠

第2章 発電機巻線の衝撃波特性(その1)

(回転子がない状態における固定子巻線の衝撃波特性)

第2章 発電機巻線の衝撃波特性(その1)

回転子がない状態における固定子巻線の衝撃波特性

§ 2.1 緒 言

発電機巻線の衝撃波特性の理論的研究は J. F. Calvert⁽⁹⁾, E. Friedländer⁽¹⁰⁾, B. C. Robinson⁽¹¹⁾, による論文が発表されている。Calvert, Friedländer 両氏は発電機巻線を巻回間の静電容量, 対地静電容量が均一に分布したインダクタンス回路として理論的に処理している。

Robinson 氏は上記の理論にスロット内に納まっている二本の線輪間の結合を考慮して処理している。この場合二本の線輪の導体が溝内において互に並行していると仮定している。さらに実験的には E. W. Boehne⁽¹²⁾, E. M. Hunter⁽¹³⁾ 等の論文が発表されている。Boehne 氏は発電機の衝撃波特性を実験的に研究した最初の人である。

筆者は第二京大法⁽¹⁴⁾を用いて回転子を取り除いた状態における発電機巻線の過渡波動インピーダンスを多数測定し、これら過渡波動インピーダンスオッシログラムを解析して固定子巻線中の進行波の伝播特性を明らかにすることができたので、本章において述べることにする。

回転子を取り除いた状態において固定子巻線を三相送電線路と見做し、第2.1表に示す試験ケースについて、各相の過渡波動インピーダンスを実測した。その実測したオッシログラムならびに測定方法等は附録(附録第1章, 第2章参照)に記載しておいた。

衝撃電圧発生装置の内部インピーダンス函数を $Z_m(p)$ とし、これに標準インピーダンス函数 $Z_s(p)$ を接続し、その時の出力電圧を $E_s(p)$, 未知のインピーダンス函数 $Z_x(p)$ を接続した時の出力電圧を $E_x(p)$ とすると、この2回の測定から未知のインピーダンス函数 $Z_x(p)$ は次式で求められる。すなわち、

$$Z_x(p) = \frac{E_x(p)}{E_s(p) + \frac{Z_s(p)}{Z_m(p)} [E_s(p) - E_x(p)]} Z_s(p) \quad (2.1)$$

筆者は短時間域において直插法が採用できるようにするために、測定回路のインピーダンス函数を

$$Z_m(p) \gg Z_s(p)$$

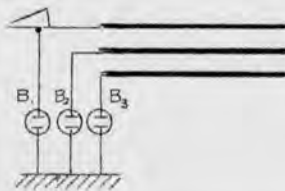
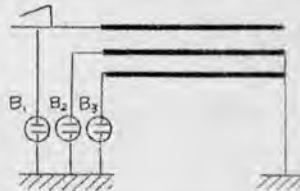
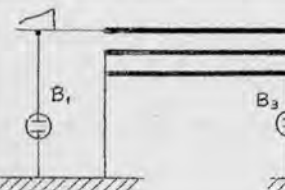
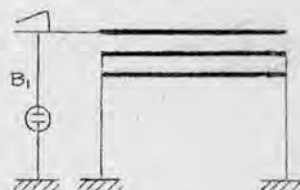
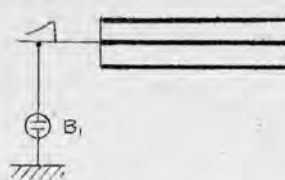
の条件とし、 $Z_m(p)$, $Z_s(p)$ を純抵抗 R_m , R_s とすると、(2.1) 式は

$$Z_x(p) = \frac{E_x(p)}{E_s} R_s \quad (2.2)$$

$E_s(p)$ の波形が矩形波である場合には、(2.2) 式は (2.3) 式となり、実測した過渡波動インピーダンスから任意の時間における波動インピーダンスを直接時間函数として求めることができる。すなわち、

$$Z_x(t) = \frac{e(t)}{E_s} R_s \quad (2.3)$$

第 2.1 表

	回 路		回 路
P		S	
Q		T	
R			

註 B_1, B_2 および B_3 はブラウン管

したがって、実測に当つては(2.3)式が満足するように測定回路のインピーダンスを決定した。

第2.2節においては発電機巻線の過渡波動インピーダンスの初期値に対称三相送電線の理論を適用し、単層、鎖形巻巻線と二層、重ね巻巻線との衝撃波に対する相違はらびに、送電線との相違を論じた。

第2.3節においては終端よりの反射波が始端に到達するまでの過渡波動インピーダンス波形に及ぼす巻線方式と、初期の波形について述べ、第2.4節においては発電機巻線の波動インピーダンス、波頭の伝播速度、減衰について述べる。

2.2 固定子巻線の初期進行波特性

固定子巻線は進行波に対して短い線路と同様の特性を有していると *Boehme* 氏初^{⑨, ⑩, ⑫}の著者が論じている。筆者は第二京大法により実測した過渡波動インピーダンスの初期値に対し、対称三相送電線の理論を適用し、発電機巻線の波動性を検討することにする。

2.2.1 対称三相線路として取扱つた時の対称分波動インピーダンス

固定子巻線を有限長の線路とし、考察を加える。したがって第2.1表の試験ケース中PQおよびRの過渡波動インピーダンスの初期値より対称三相線路として対称分波動インピーダンスを求める。

使用する記号は下記の通りである。

e : 巻線に加える衝重電圧

e_u, e_v, e_w : U相, V相, およびW相の各相電圧

i_u, i_v, i_w : " " " の各相電流

Z_u, Z_v, Z_w : " " " の各相巻線始端の過渡インピーダンス。

e_{u0}, e_{u1}, e_{u2} : 零相, 正相, 逆相 各成分電圧

Z_0, Z_1, Z_2 : " " " 波動インピーダンス

(1) 第2.1表のPケース.

この場合U相に衝重電圧 e を加えると, 次式が得られる.

$$\left. \begin{aligned} e_u &= e \\ i_v &= 0 \\ i_w &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

(2.4) 式を対称分書き換える。なお対称三相線路であるので $Z_1 = Z_2$ である条件を入れると, (2.5) 式となる.

$$\left. \begin{aligned} e &= e_u = e_{u0} + e_{u1} + e_{u2} \\ 0 &= i_v = \frac{e_{u0}}{Z_0} + a^2 \frac{e_{u1}}{Z_1} + a \frac{e_{u2}}{Z_1} \\ 0 &= i_w = \frac{e_{u0}}{Z_0} + a \frac{e_{u1}}{Z_1} + a^2 \frac{e_{u2}}{Z_1} \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

$$\text{ただし } a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}, \quad a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

(2.5) 式の第2式および第3式より,

$$\left. \begin{aligned} e_{u1} &= e_{u2} \\ \frac{e_{u0}}{Z_0} &= \frac{e_{u1}}{Z_1} \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

(2.6) 式を(2.5)式の第1式に代入すると,

$$\left. \begin{aligned} e_u &= e_{u0} \left(1 + \frac{2Z_1}{Z_0} \right) \\ i_u &= 3i_{u0} = e_{u0} \frac{3}{Z_0} \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

したがって, 巻線の始端における過渡波動インピーダンスの初期値は

$$Z_{up} = \frac{e_u}{i_u} = \frac{Z_0 + 2Z_1}{3} \quad (2.8)$$

(ただし, Z_{up} はPケースにおける過渡インピーダンスの初期値)

となる.

(2) 第2.2表のQケース.

この場合には第2.1表のQケースの回路から次式が成立する.

$$\left. \begin{aligned} e_u &= e \\ e_v &= 0 \\ e_w &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.9)$$

(2.9)式を対称分で書き換えると、

$$\left. \begin{aligned} e &= e_u = e_{u0} + e_{u1} + e_{u2} \\ 0 &= e_v = e_{u0} + a^2 e_{u1} + a e_{u2} \\ 0 &= e_w = e_{u0} + a e_{u1} + a^2 e_{u2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.10)$$

(2.10)式より

$$e_{u0} = e_{u1} = e_{u2} = \frac{e}{3} \dots\dots\dots (2.11)$$

U相の始端における電流は波頭部分に対して次式であらわされる。
すなわち

$$i_u = i_{u0} + i_{u1} + i_{u2} \dots\dots\dots (2.12)$$

(2.11)式の条件を入れると、

$$\begin{aligned} i_u &= \frac{e_{u0}}{Z_0} + \frac{e_{u1}}{Z_1} + \frac{e_{u2}}{Z_1} \\ &= \frac{e}{3} \left(\frac{1}{Z_0} + \frac{2}{Z_1} \right) \dots\dots\dots (2.13) \end{aligned}$$

したがって、(2.13)式より始端の過渡インピーダンスを Z_{uR} とすると、波頭部分に対して

$$\frac{1}{Z_{uR}} = \frac{i_u}{e_u} = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{Z_0} + \frac{2}{Z_1} \right) \dots\dots\dots (2.14)$$

となる。

(3) 第2.1 条の尺ケース.

この場合には次式が成立する。すなわち

$$e_u = e_v = e_w = e \dots\dots\dots (2.15)$$

したがって

$$e_{u1} = e_{u2} = 0 \dots\dots\dots (2.16)$$

$$\text{また、} \quad i_u = i_v = i_w = \frac{e_{u0}}{Z_0} = \frac{e}{Z_0} \dots\dots\dots (2.17)$$

それ故に、この場合の始端過渡インピーダンスの初期値と Z_{uR} とすると、

$$Z_{uR} = \frac{e_u}{i_u + i_v + i_w} \dots\dots\dots (2.18)$$

で与えられるから、(2.15)、(2.17)を(2.18)式に代入すると、

$$Z_{uR} = \frac{Z_0}{3} \dots\dots\dots (2.19)$$

となる。

以上第2.1表に示したP,QおよびRケースにおけるそれぞれの始端過渡波
動インピーダンスを対称分波動インピーダンスで表わした。すなわち、第二
京大法においては強制電圧を矩形波になるように調整しているので、始端の
過渡インピーダンスは e_u/i_u にて求めることができる。

2.2.2. 実測結果に対する検討

第2.2.1項ではP,QおよびRの各試験ケースにおいて、固定子巻線を対称
三相線路として取り扱った時、巻線の波動インピーダンスと対称分波動イン
ピーダンスとの関係式を求めたので、PおよびRケースの実測結果に適用し
対称分波動インピーダンスを求めると共に、対称分波動インピーダンスより
Qケースにおける波動インピーダンスを求め、実測結果と一致するかどう
かを検討してみることにする。

1. 3450V, 400kVA, 単層線形巻線電機

当該発電機の試験ケースP,QおよびRにおける各相巻線の過渡波動イン
ピーダンス、オッシログラムを示すと第2.7図である。このオッシログラ
ムから侵入波が終端において反射し、始端に帰つて来るまでの間、固定子
巻線は波動特性を有していることを知る。すなわち、線路の巻回間には直
列容量を有しているが、巻線となると巻回間容量は直列につながっていない
ので変圧器の場合とはことなり、波動性を有することになる。また、三
相巻線の各相の過渡波動インピーダンスとも初期においては等しいので、
各相とも侵入波に対しては平衡している。しかし入来波が終端で反射して
から、反射波が始端に帰つて来るまでの間は各相の波動インピーダンスは
巻線間あるいは同相線間との相互誘導のためやや異なっている。これは、第
2.4節で述べるが、波頭が変歪、減衰してくると同相線間との相互誘導が
作用してくるからである。

第2.7図のオッシログラムより各試験ケースにおける各相の波頭の波動
インピーダンスを求めると、第2.2表の通りである。

第2.2表 345kV, 400kVA波動インピーダンス

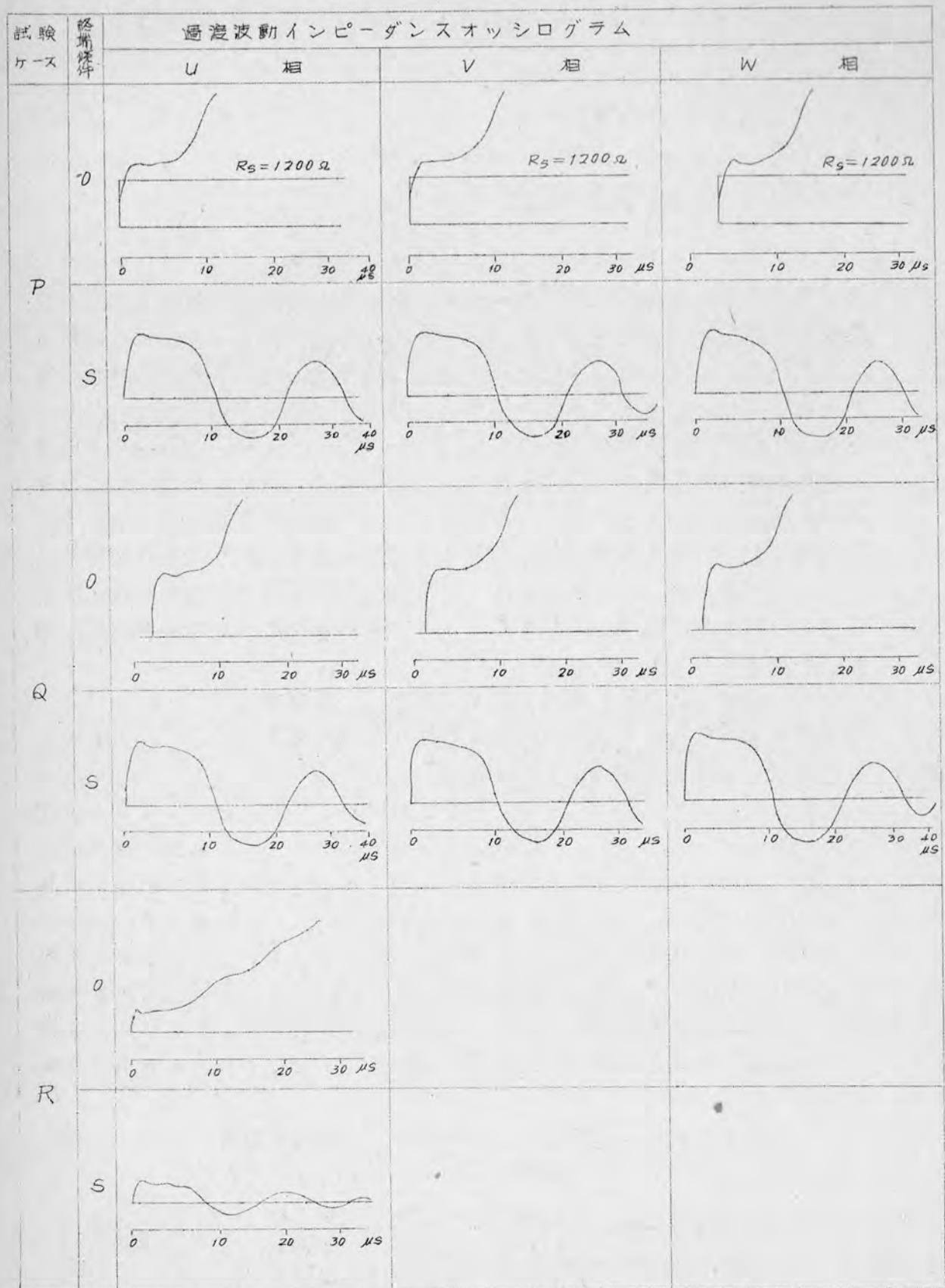
試 験 ケース	波動インピーダンス (Ω)		
	U 相	V 相	W 相
P	1500	1500	1500
Q	1500	1500	1500
R	500		

第2.2表より

$$\left. \begin{aligned} Z_{up} &= Z_{vp} = Z_{wp} = 1500 \Omega \\ Z_{ur} &= 500 \Omega \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.20)$$

ただし、 Z_{up} , Z_{vp} , Z_{wp} は試験ケースPの各相波動インピーダンス、ま
た Z_{ur} はRケース（三相一括した場合）の波動インピーダンス。

第2.1図 3450V, 400kVA 過渡波動インピーダンス



註. Oは終端開放, S終端短路とあらわす

(2.20)式、(2.8)式および(2.19)式より各対称分を求めると、

$$Z_0 = Z_1 = Z_2 = 1500 \Omega \quad (2.21)$$

となり、各対称分は等しい結果となる。

次に(2.21)式の条件を(2.14)式に代入すると試験ケースQの場合の波動インピーダンスが求められる。すなわち、

$$Z_{uQ} = Z_{vQ} = Z_{wQ} = 1500 \Omega \quad (2.22)$$

したがって、(2.21)式の条件より求めた波動インピーダンスは第2.2表に示したQケースの実測結果と一致する。それ故に当該発電機の巻線は、各試験ケースにおける各相の波動インピーダンス、各相の各試験ケースの波動インピーダンスが相等しいという条件、一対称分では各対称分波動インピーダンスが相等しい条件を有する対称三相線路ということになる。したがって送電線とは趣を異にした線路と考える。すなわち発電機の各相巻線は電気角度 120° 異にして、一部は鉄心中に配置され、一部は鉄心の外にある。単層巻では溝中に一個の線輪導体が納まっているため、隣溝との間に相互誘導は考えられるが、急峻波頭では鉄心を通る磁束が少く相互誘導が小さいものと考ええる。各相端子間とは溝を二つ以上隔てるので、始端附近では各相巻線相互間に誘導係数がないと考える。たゞ線輪端部では存在する。

2. 6600V, 1500kVA単層、鎖形巻、発電機

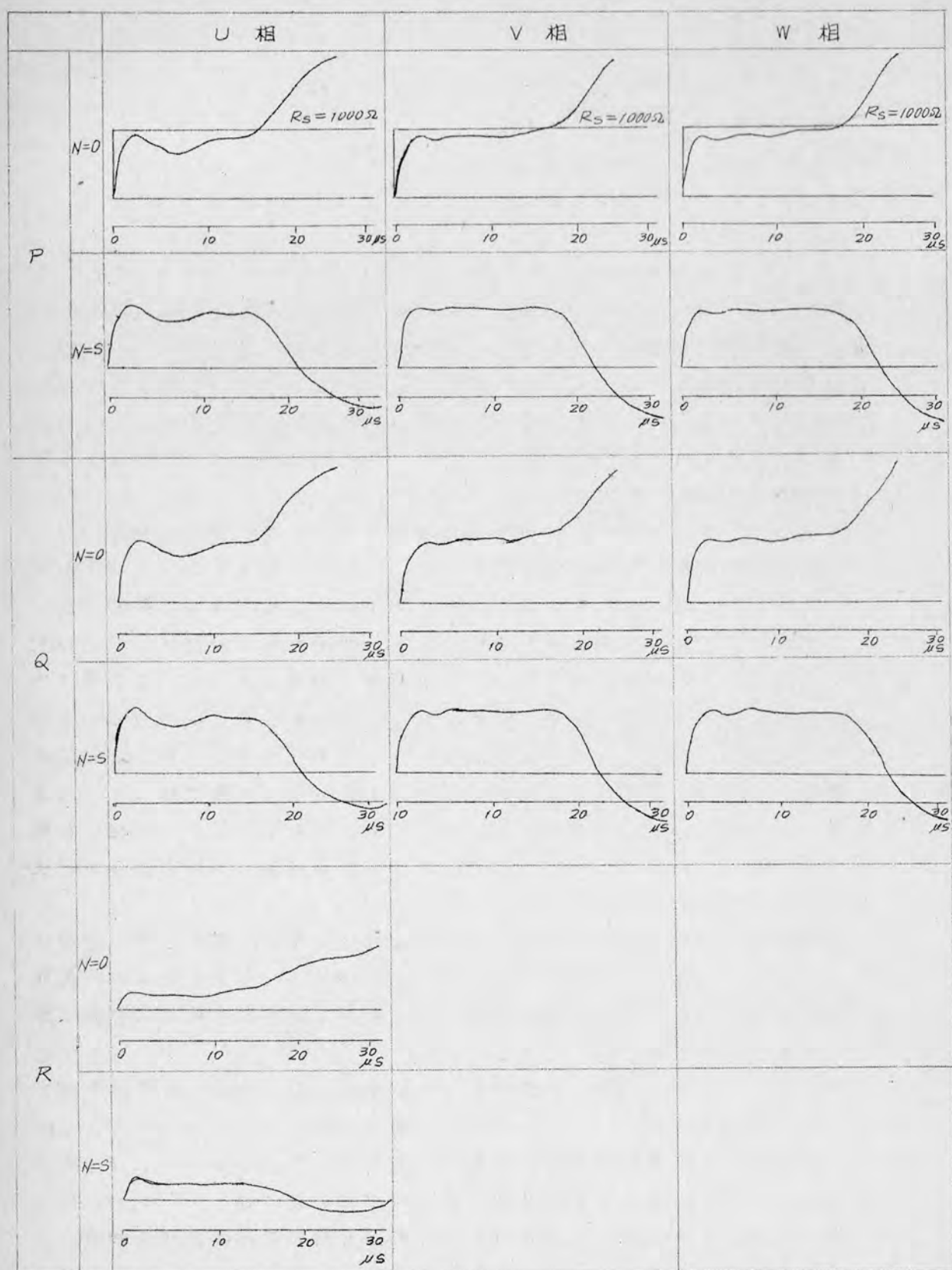
当該発電機の回転子がない状態における過渡波動インピーダンスのオシログラムを示すと第2.2図である。

このオシログラムにおいてU相の過渡波動インピーダンスの波形は他のV,W相のオシログラムとは異つたものである。これは回転子がある状態で電位分布を測定する時に線輪の巻回間があるいは痕り線に絶縁が破壊され、短絡を生じていると考える。(このことについては第6章において説明する)こゝでは初期における波動インピーダンスについて前回と同様考察を加えてみる。V相とW相の過渡波動インピーダンスは反射波が始端に帰つて来るまで送電線の波動性と極めて類似したものである。第2.2図よりP,QおよびRの試験ケースに対する波動インピーダンスを求めると第2.3表の通りである。

第2.3表 6.6kV, 1500kV波動インピーダンス

試験 ケース	波動インピーダンス(Ω)		
	U 相	V 相	W 相
P	880	880	880
Q	880	880	880
R	290		

第2.2図 6.600V, 1.500kVA 過渡波動インピーダンス



第 2.3 表より

$$\left. \begin{aligned} Z_{up} &= Z_{up} = Z_{wp} = 880 \Omega \\ Z_{ur} &= 290 \Omega \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.23)$$

したがって、対称分波動インピーダンスは次の値となる。

$$\left. \begin{aligned} Z_0 &= 870 \Omega \\ Z_1 &= Z_2 = 885 \Omega \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.24)$$

(2.24) 式の対称分波動インピーダンスを (2.14) 式に代入して Z_{uq} を求めると、

$$Z_{uq} = 875 \Omega \quad (2.25)$$

となり、第 2.3 表の実測値 880Ω と大体一致し、前述した 400 ㍉V A 巻電機の場合と同様に考えられる。すなわち、P, Q ケースにおける各相巻線の波動インピーダンスは等しい。また R ケースの波動インピーダンスは、P および Q ケースの各相巻線の波動インピーダンスの $1/3$ である。しかし、零相分と正相分の波動インピーダンスは大体等しく、かつ Z_{uq} の値は計算値と実測値が一致する。

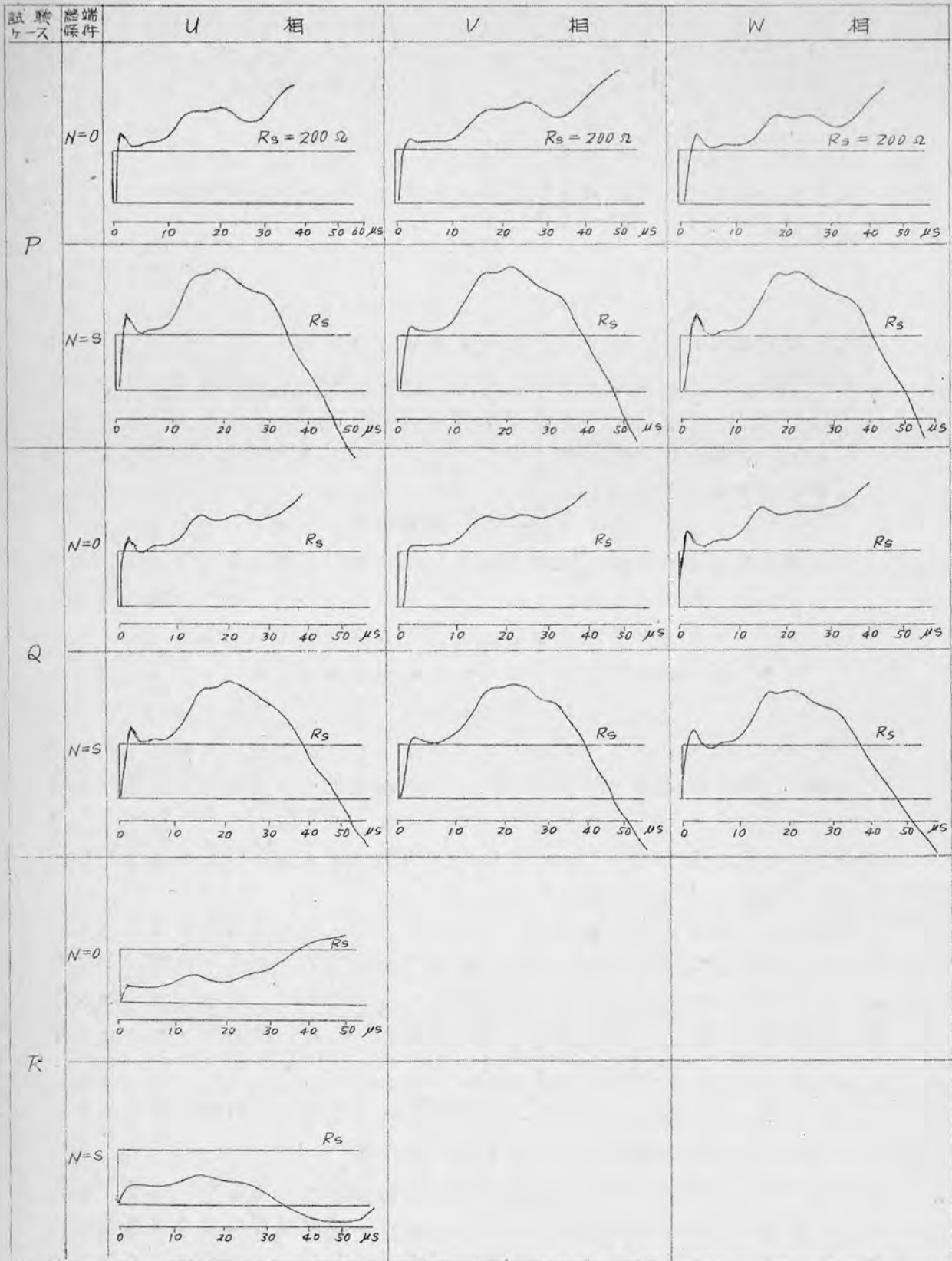
3. $11,000 \text{ V}$ 、 $11,000 \text{ ㍉V A}$ 二層重ね巻、2 重 Y 結線巻電機

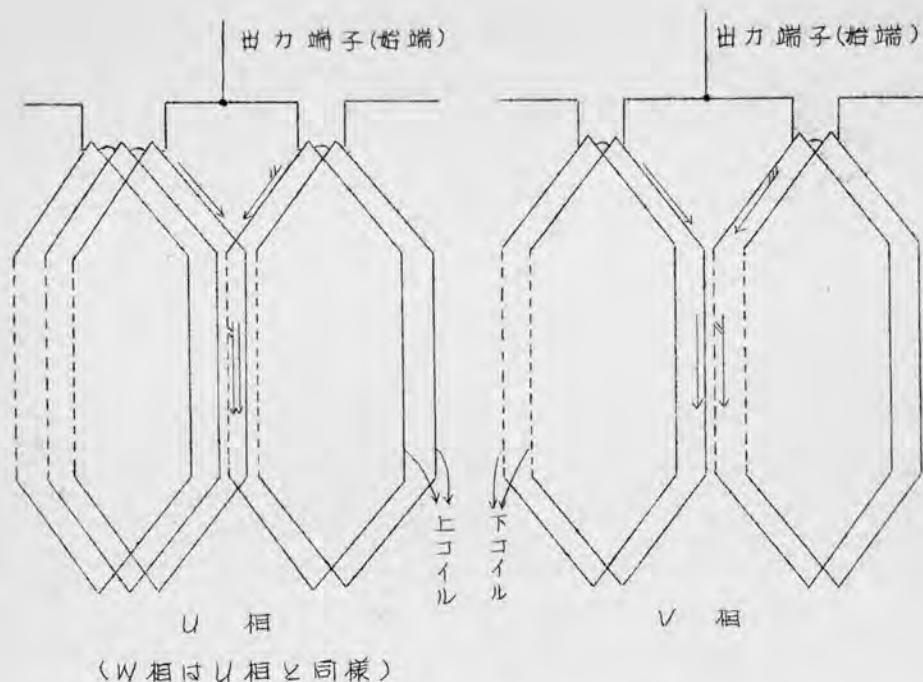
当該巻電機固定子巻線の過渡波動インピーダンスを P, Q および R の試験ケースについて各相とも測定を行つた。そのオシログラムは第 2.3 図に示す通りで、前述の単層鎖形巻巻線とは、入来電圧波が終端において反射したと考えられる時刻後の対応電圧波の様相が相重している。また第 2.3 図より知る如く、U 相と W 相の過渡波動インピーダンスの初期において突起部を生じていること、さらに終端を開放した時と短絡した時とでは初期の波動インピーダンスがことなる。この突起部を生ずる理由については本章第 2.3.3 項にて詳しく説明することにする。したがってここでは U, W 相と V 相の過渡波動インピーダンスの初期における相重について線輪の配置状況より概説すれば次の通りである。

本測定は当該巻電機の巻線の出カ端子より単位電流を流入して、過渡インピーダンスを測定したので、先づ線輪の展開図より検討してみる。展開図に第 1 章第 1.3.4 図に記載してあるが、各相の出カ端子附近の線輪の配置を転載したのが第 2.4 図である。

第 2.4 図は U 相と V 相との展開図で、U 相の右廻り左廻りの分岐巻線の最初の線輪は歯を隔てて、左右の溝にそれぞれ納まつている。V 相は右廻り、左廻りの分岐巻線の最初の線輪は上コイル、下コイルとなり同一溝に納まつている。W 相は U 相と同様に最初の線輪は歯を隔てて、左右の溝にそれぞれ納まつている。したがって、U 相と W 相の巻線は始端の線輪において同相線輪間の相互インダクタンスは歯を隔てて、それぞれ存在しているので、波頭が急峻なる場合は無視できる。一方 V 相巻線の始端の線輪は同一溝内に上コイル、下コイルとなつて納まつているので相互インダクタ

第2.3図 11.000V, 11.000kVA 過渡波動インピーダンス





第2.4図 出力端子における線輪展開図

ンスが存在する線輪の溝内における自己インダクタンスを L 、相互インダクタンスを M とすると、始端からみた各相のインダクタンスは、

$$\begin{aligned} \text{U, W 相} & \cdots \cdots \cdots \frac{1}{2}L \\ \text{V 相} & \cdots \cdots \cdots \frac{1}{2}(L+M) \end{aligned}$$

となる。

次に終端を開放した時と短絡した時とでは $5 \sim 10 \mu s$ の間で波動インピーダンスが異なっている。すなわち開放した時の波動インピーダンスが短絡した時よりやや大きい。(第2.4表参照)。この理由として下記の如く解釈される。

一般に単一線路の波動インピーダンスは $\sqrt{L/C}$ をもつて表わすことができるが、当該発電機の線輪展開図(第1.34図参照)から、始端に近い線輪と終端に近い線輪とが同一溝内に納まっているので、始端に近い線輪の対地静電容量が増すためと考える。すなわち $\sqrt{L/C}$ の C が増大するためと考えられる。

なお終端で反射がおきたと仮定される頃から、反射波が始端に帰って来るまでの波形については第2.3節において述べる。

第2.3図の過渡インピーダンスのオシログラムより試験ケースP、QおよびRにおける各相の波動インピーダンスは初期の突起部分を避けて、 $5 \mu s$ 附近の一定の値になっている個所にて求めた。その表が第2.4表である。

第 2.4 表 11 kV, 11,000 kVA 波動インピーダンス

試 験 ケース	波動インピーダンス (Ω)		
	U 相	V 相	W 相
P	230 (210)	230 (210)	230 (210)
Q	220 (200)	220 (200)	220 (200)
R	70		

(註). () 中は終端短絡した時の波動インピーダンスを表わす

$$\begin{aligned} \text{第 2.4 表より} \quad Z_{up} = Z_{vp} = Z_{wp} = 230 \Omega \\ Z_{ur} = 70 \Omega \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} Z_{up} = Z_{vp} = Z_{wp} = 230 \Omega \\ Z_{ur} = 70 \Omega \end{aligned}} \right\} \dots \dots \dots (2.26)$$

(2.26), (2.8) および (2.19) 式より

$$\begin{aligned} Z_0 = 210 \Omega \\ Z_1 = Z_2 = 240 \Omega \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} Z_0 = 210 \Omega \\ Z_1 = Z_2 = 240 \Omega \end{aligned}} \right\} \dots \dots \dots (2.27)$$

となる。したがつて (2.27) 式を (2.14) 式に代入して試験ケース Q の波動インピーダンスを求めると、

$$Z_{uq} \approx 230$$

となり、第 2.4 表の値と大体一致したものとなる。

当該発電機の如く二層巻において溝内に他相の線輪と納められている場合には過渡時にも相互誘導があり、したがつて P ケースと Q ケースの試験ケースによつて波動インピーダンスが異なる。しかしその相違は僅かである。また R ケースの三相一括した時の波動インピーダンスが、P、Q ケースの $1/3$ より小さい。これは各相巻線間の相互誘導は負の符号をとるためと考える。したがつて前述の単相鎖形巻線とは異つてゐる。

4. 11,000 V, 15,000 kVA 二層、重ね巻、三重星形結線発電機

当該発電機の固定子巻線の過渡波動インピーダンスを試験ケース P, Q および R について実測した。そのオシログラムが第 2.5 図である。各オシログラムの初期の部分は僅か振動しているが、一定にはつてゐる部分において各相波動インピーダンスを求めたのが第 2.5 表である。

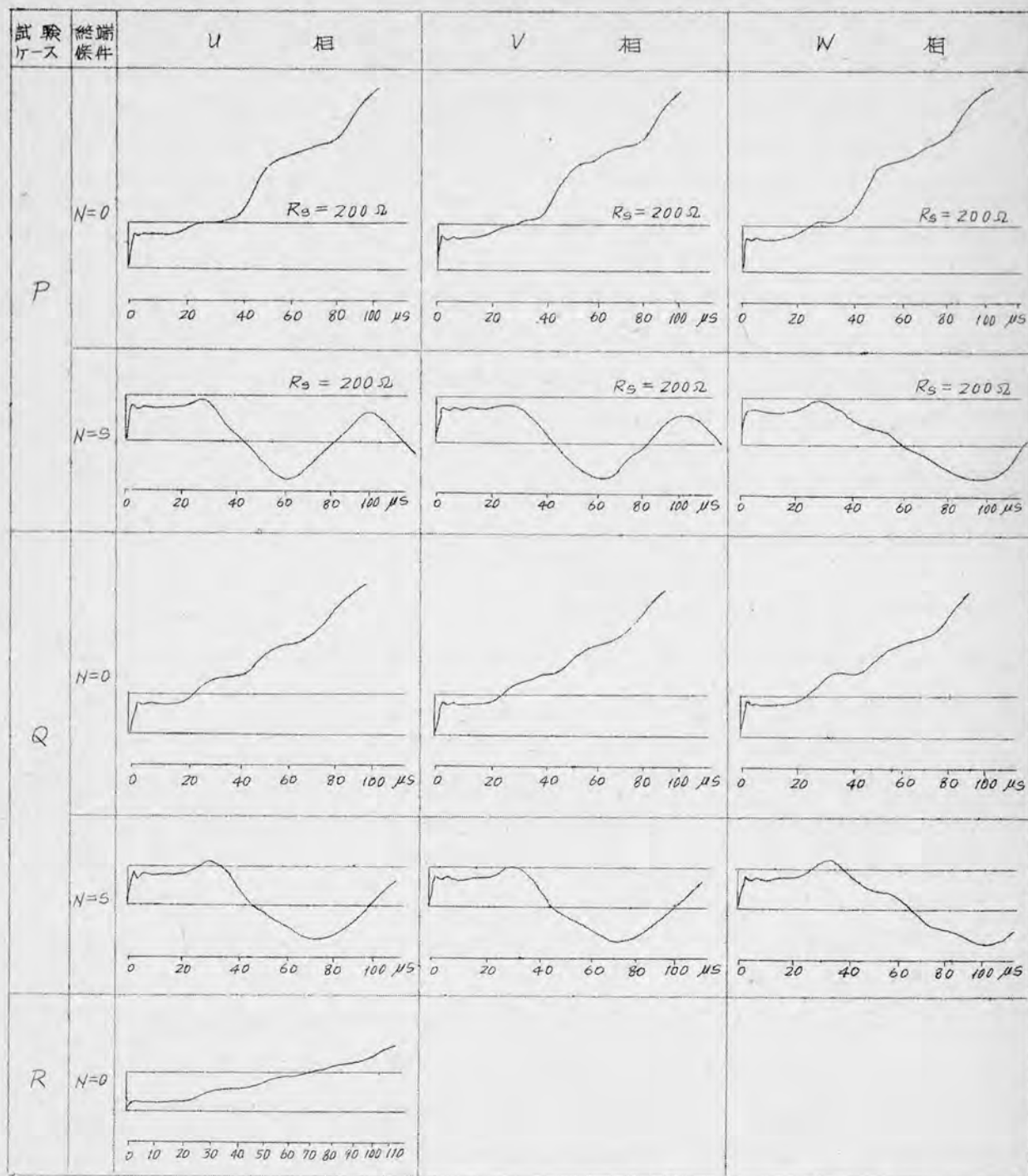
第 2.5 表 11 kV, 15,000 kVA 波動インピーダンス

試 験 ケース	波動インピーダンス (Ω)		
	U 相	V 相	W 相
P	170	170	170
Q	150	150	150
R	46		

第 2.5 表より

$$\begin{aligned} Z_{up} = Z_{vp} = Z_{wp} = 170 \Omega \\ Z_{ur} = 46 \Omega \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} Z_{up} = Z_{vp} = Z_{wp} = 170 \Omega \\ Z_{ur} = 46 \Omega \end{aligned}} \right\} \dots \dots \dots (2.28)$$

第2.5図 11,000V, 15,000kVA過渡波動, インピーダンス



(2.28) 式, (2.8) 式および (2.19) 式より

$$\left. \begin{aligned} Z_0 &= 138 \Omega \\ Z_1 &= Z_2 = 186 \Omega \end{aligned} \right\} \quad (2.29)$$

に式の値を (2.14) 式に代入すると,

$$Z_{u2} = 167 \Omega$$

となり, 第2.5表の値と一致せず, 当該発電機においては, P ケースの波

動インピーダンスとQケースの波動インピーダンスが僅かであるが相違している。またRケースの波動インピーダンスはPケースの1/3以下、Qケース波動インピーダンスの大体1/3である。前述した11,000 kVA発電機とは展開図において同相の分岐巻線の巻き方が異なる程度で、大した相違は認められない。ただPケースとQケースの波動インピーダンスが異なる点において、巻線間の相互インダクタンスおよび誘導係数が前者の発電機に比して大きいものと考えられる。

(5) 6600 V, 4375 kVA 二層、重ね巻、二重星形結線発電機

当該発電機の固定子巻線の各相過渡波動インピーダンスは試験ケースS, T, Rについて実測した。そのオッシログラムは第2.6図に示す。このオッシログラムより各相の各試験ケースの波動インピーダンスを求めたのが第2.6表である。

第2.6表 6.6 kV, 4375 kVA 波動インピーダンス

試験 ケース	波動インピーダンス (Ω)		
	U 相	V 相	W 相
S	325	325	325
T	325	325	325
R	110		

当該発電機においては試験ケースP, Qについて実測していないが、第2.6表からして、S, Tケースの波動インピーダンスはRケースの大体3倍である。したがって、各相巻線は単一線路として考察される。すなわち当該発電機は第1.24図の固定子巻線の展開図より、1相分の線輪は同相の線輪と同一溝に納まり、他相線輪との結合が溝内にはないという点。量層、鋸形巻線と同一であるので、単層鋸形巻線と同一の特性を有していることが了解される。

(6) 11,000 V, 1,000 kVA 二層重ね巻、一重星形結線発電機

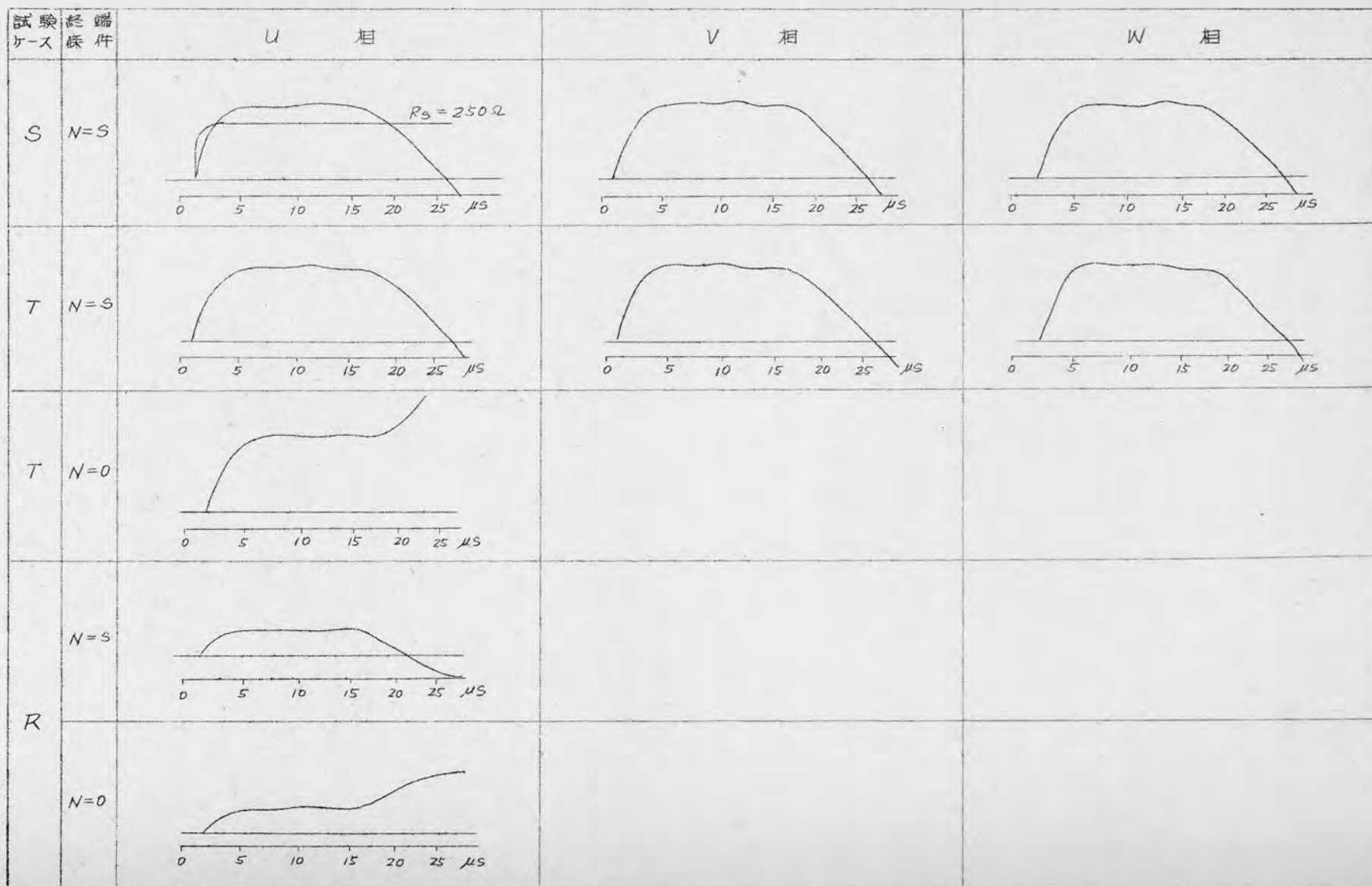
当該発電機は二層重ね巻で、毎相毎極の溝数3で短距巻である。なお、扇極接線法を採用しており、かつ一相分の巻線は第1.39図の展開図に見る如く折返して巻かれている。

試験ケースP, QおよびRの各相過渡^(過渡)インピーダンスのオッシログラムを第2.7図に示しておいた。各波動インピーダンスを5μsの点で求めたのが第2.7表である。

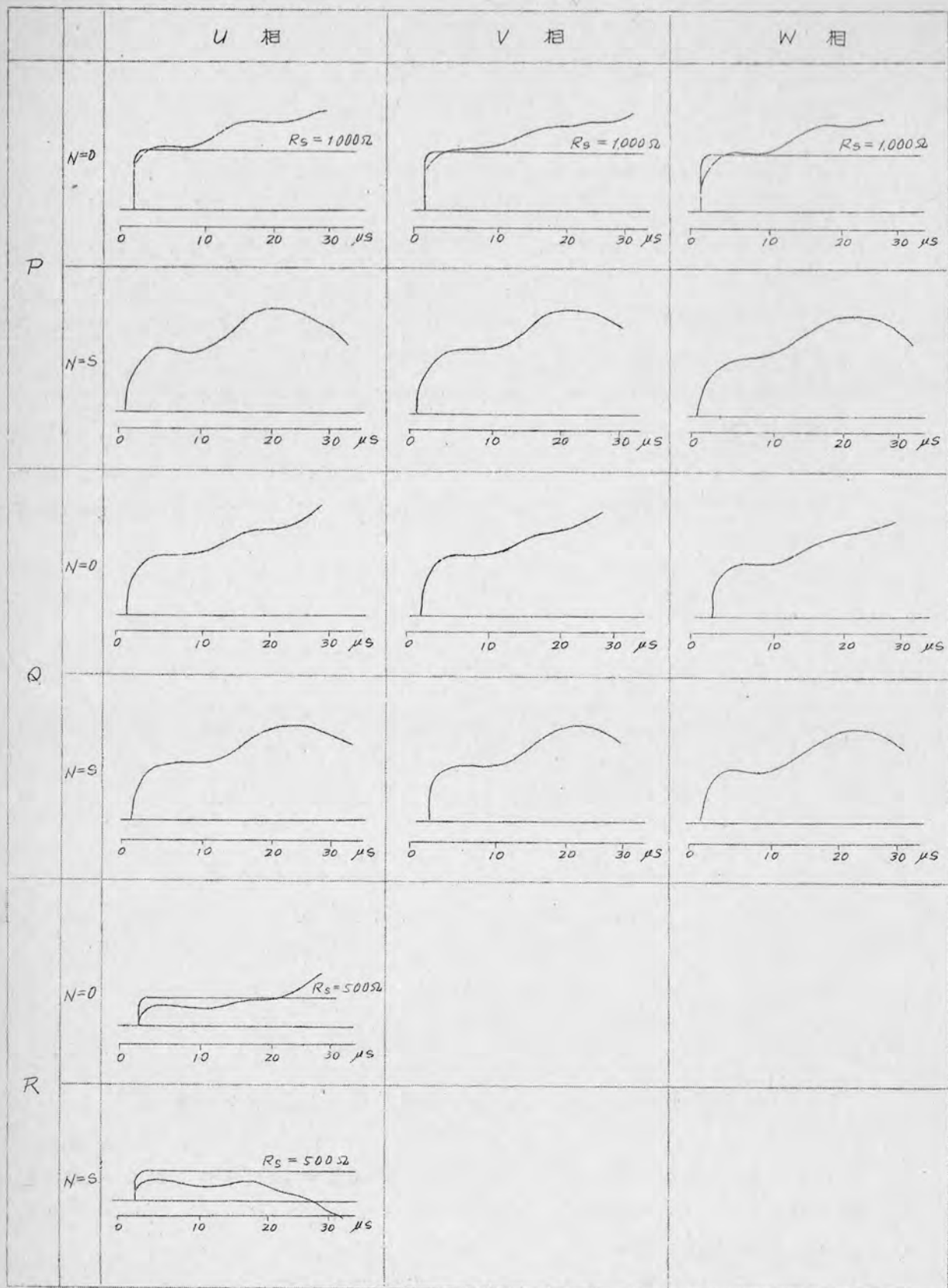
第2.7表 波動インピーダンス

試験 ケース	波動インピーダンス (Ω)		
	U 相	V 相	W 相
P	1100	1100	1100
Q	1050	1050	1050
R	300		

第 2.6 図 6.6 kV, 4.375 kVA 遷渡波動インピーダンス



第2.7図 11kV, 1,000kVA 過渡変動インピーダンス



第2.7表より $Z_{up} = Z_{vp} = Z_{wp} = 1100 \Omega$
 $Z_{ur} = 300 \Omega$

であるので、

$$\left. \begin{aligned} Z_0 &= 900 \Omega \\ Z_1 &= Z_2 = 1200 \Omega \end{aligned} \right\} \quad (2.30)$$

(2.30) 式の数値を (2.14) 式に代入すると、

$$Z_{ur} = 1200 \Omega$$

となり、第2.7表の値と一致せず。当該発電機ではPケース、Qケースの各相波動インピーダンスは大体等しい値であるが、RケースはP、Qケースの1/3以下の波動インピーダンスとなつてゐる。また Z_0 は900Ωで Z_1 が1200Ωとなり Z_0 は Z_1 の3/4となつてゐる。

(7) 3.300 V, 40 kVA 二層、重ね巻、一重星形発電機

過渡波動インピーダンスは試験ケース、P、Q、R、SおよびTにて測定した。これらのオシログラフは第2.8図に図示しておいた。また初期における各相の各試験ケースにおける波動インピーダンスを求めたのが第2.8表である。

第2.8表 3.3 kV, 40 kVA 波動インピーダンス

試験 ケース	波動インピーダンス (Ω)		
	U	V	W
P	3,200	3,200	3,200
Q	3,000	3,000	3,000
R	1,050		
S	3,000	3,000	3,000
T	"	"	"

第2.8表より $Z_{up} = Z_{vp} = Z_{wp} = 3,200 \Omega$
 $Z_R = 1050 \Omega$

であるので、これより各対称分波動インピーダンスは

$$\left. \begin{aligned} Z_0 &= 3150 \Omega \\ Z_1 &= Z_2 = 3200 \Omega \end{aligned} \right\} \quad (2.31)$$

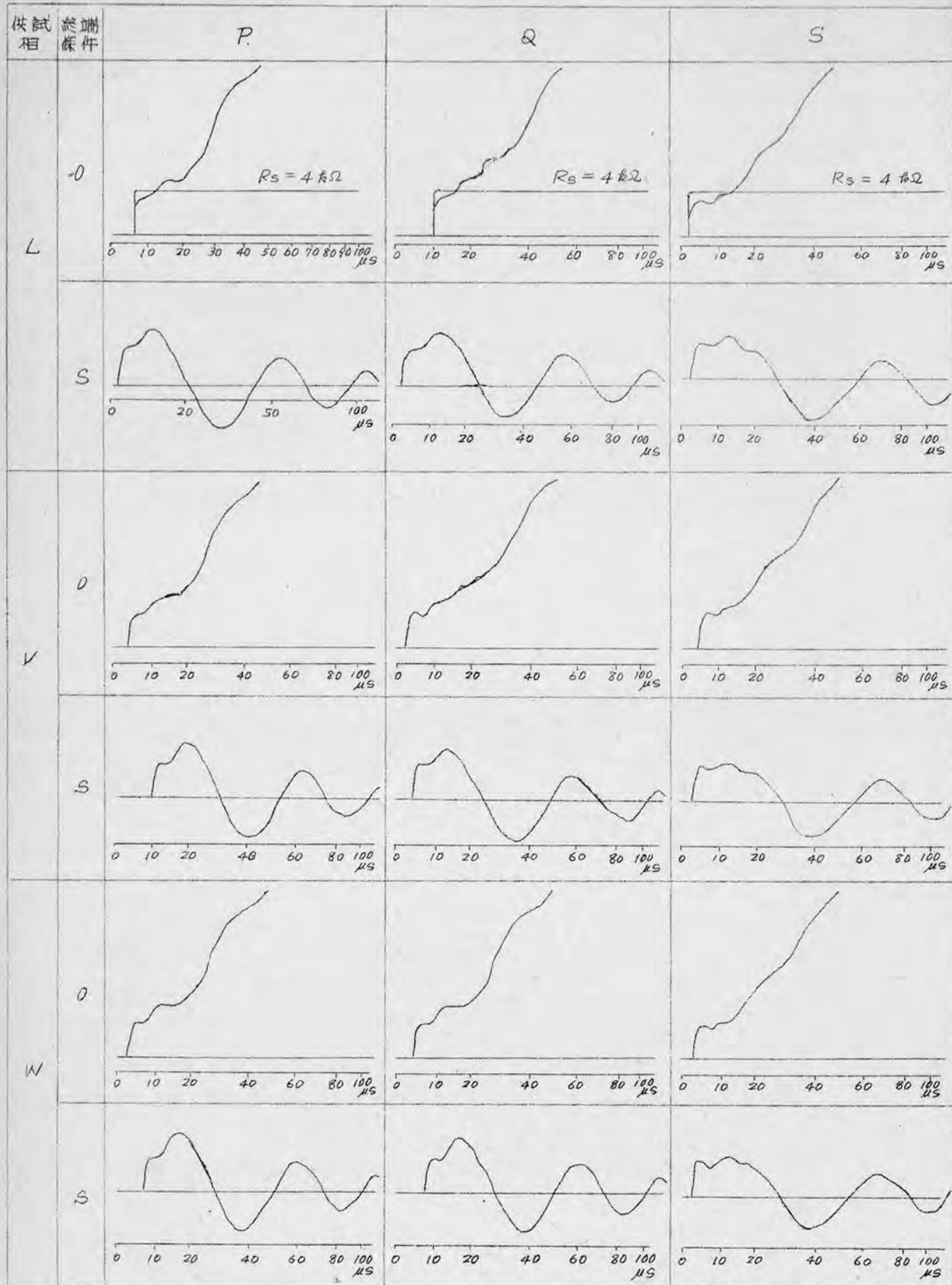
(2.31) 式の数値を (2.14) 式に代入し、 Z_{ur} を求める。

$$Z_{ur} = 3200 \Omega \quad (2.32)$$

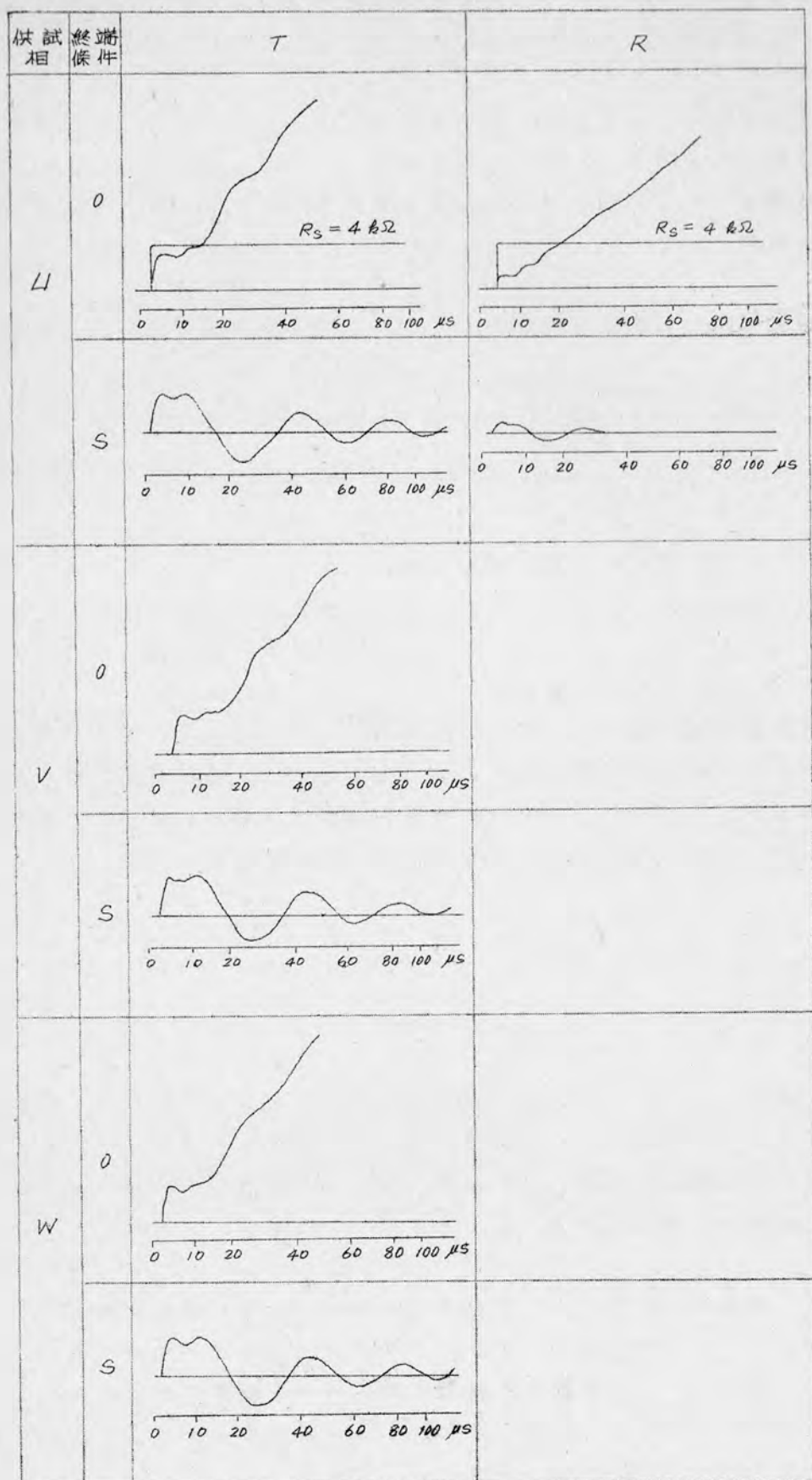
となり、第2.8表の値よりやや大きい。当該発電機ではP、Qケースの各相波動インピーダンスは等しくRケースの波動インピーダンスはP、Qケースの大体1/3である。

以上図表がない状態における7台の発電機固定巻線の過渡波動インピーダンスのオシログラムより初期における波動インピーダンスを求め、線路と同様に三相線路として個々に検討してきたので、以下考察を加えてみる。

第2.8図 3.3 kV, 40 kVA 過渡特性ピーダンス (その1)



第2.8図 3.3 kV, 40 kVA 過渡波動インピーダンス (その2)



(1) 固定子の各相巻線の過渡波動インピーダンス波形は各試験ケースにおいて大体類似した波形で、かつ各相巻線の波動インピーダンスは等しい。したがって初期においては各相は対称であるといふことができる。

(2) 試験ケース P, Q および R より各対称分波動インピーダンスを求めた結果、3450 V, 400 kVA, 6600 V, 1500 kVA の単層、鎖形巻巻電機では零相分と正相分との波動インピーダンスが等しい。また各相とも試験ケース P および Q における波動インピーダンスが等しく、R ケースの波動インピーダンスは、P および Q の波動インピーダンスの $1/3$ である。

一般に対称三相線路の対称分インピーダンスは次式であらわされる。すなわち

$$\left. \begin{aligned} Z_0 &= \sqrt{\frac{L + 2M}{k + 2k'}} \\ Z_1 &= \sqrt{\frac{L - M}{k - k'}} \end{aligned} \right\} \quad (2.33)$$

ただし L : 固定子巻線の単位長当りの自己インダクタンス

M : " " 相互インダクタンス

k : " " 容量係数

k' : 固定子巻線間の " 誘導係数

単層、鎖形巻巻線では、第 1, 30 図および第 1, 36 図の固定子巻線展開図より各相の巻線は電気角度 120° の間隔をもつて固定子鉄心中に配列されている。したがって、各相の線輪導線間には誘導係数がなく、波頭が急峻なる場合は鉄心を通る磁束が少いので、初期値においては、 $M=0$, $k'=0$ と考えられるので、(2.33) 式は (2.34) 式となる。したがって

$$\left. \begin{aligned} Z_0 &= \sqrt{\frac{L}{k}} \\ Z_1 &= \sqrt{\frac{L}{k}} \end{aligned} \right\} \quad (2.34)$$

零相分波動インピーダンスと正相分波動インピーダンスが同一の数式であらわされる。これは、巻線の単位長当りの自己インダクタンスと対地容量とより、波動インピーダンスが定まることを意味している。したがって単層、鎖形巻の巻線は初期においては単一の線路として考察することができる。

(3) 二層、重巻巻電機では、各相の P, Q ケースにおける波動インピーダンスは Q ケースの方が幾分小さい。これは溝中に他相の線輪と絡まっているので、巻線としては局部的に他相巻線との間に誘導係数と相互インダクタンスが存在するからである。今 P, Q ケースの波動インピーダンスを等しいとすると、(2.8) 式, (2.14) 式より、

$$\frac{Z_0 + 2Z_1}{3} = \frac{3Z_0Z_1}{Z_0 + 2Z_1}$$

の関係が成立する。 Z_0, Z_1 は共に正の整数であるので、上式が成り立つ条件には $Z_0 = Z_1$ が必要である。しかるに(2.8), (2.74)の断式を適用して求めた Z_0, Z_1 は $Z_0 < Z_1$ の関係にある。これは溝内における異なる相のそれぞれの線輪導線の進行波の進行方向が互に反対になっているため線輪導線間の相互インダクタンスは負の符号をとるので、各相線輪導線の有効インダクタンスは $L-M$ (線輪導線の自己インダクタンスを L , 導線間の相互インダクタンスを M とする)となる。線輪導線間の誘導係数は R ケースにおいては零電位となるため、 $k' = 0$ となり R ケースの波頭の波動インピーダンス Z_R は(2.35)式であらばされる。すなわち

$$Z_R = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{L-M}{k}} \quad (2.35)$$

但し、 k は線輪導線の容量係数

したがって、零相分波動インピーダンス Z_0 は(2.35)式の3倍とすると(2.34)式と比べると、他相線輪導線間の相互インダクタンスが負の符号として作用するので、(2.35)式より求めた零相分波動インピーダンスは正相分波動インピーダンスより小さくなる。

二層、重ね巻々線において、 P ケース、 Q ケースの波動インピーダンスが大体等しいと見做される時は更に $Z_0 = Z_1$ の条件が成り立つことを述べたが、(2.33)式はこの条件から

$$\sqrt{\frac{L+2M}{k+2k'}} = \sqrt{\frac{L-M}{k-k'}}$$

となる。この関係は $M=0, k'=0$ においてのみ成立する。したがってそれぞれの波動インピーダンスは(2.34)で表わしたものと同一になるので、この場合には単一線路として考察される。

- (4) 以上各相波動インピーダンスの初期値から考察した結果、発電機は多導線回路と見做することはできない。單層巻では各相巻線間の相互インダクタンスを考える必要はないが、二層巻では相互インダクタンスが作用し、それは負の符号をもつて作用している。

2.2.2 固定子巻線の結合係数と巻線法に対する考察

2.2.1項では三相線路として対称分を求め、個々に考察を加えたが、本項において他相巻線への誘導電圧を基にして多導線回路の式を用いて、初期における結合係数を求め、相互誘導、更には固定子巻線の巻線法との関係を考察してみる。

試験ケースAの回路において、相に平衡電圧を印加した時の各相巻線の電圧は(2.36)式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} e_u &= Z_{uu} i_u + Z_{uv} i_v + Z_{uw} i_w \\ e_v &= Z_{vu} i_u + Z_{vv} i_v + Z_{vw} i_w \\ e_w &= Z_{wu} i_u + Z_{wv} i_v + Z_{ww} i_w \\ i_u &= 0 \\ i_w &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.36)$$

ここに Z_{uu} , Z_{vv} , Z_{ww} は各相巻線の自己波動インピーダンス, Z_{uv} , Z_{vu} , Z_{uw} は各相巻線間の相互波動インピーダンス ($Z_{uv} = Z_{vu}$, $Z_{vw} = Z_{wv}$, $Z_{wu} = Z_{uw}$ である) である。

(2.36) 式より, v , w 相に誘導電圧 e_v , e_w を求めると (2.37) 式となる。

$$\left. \begin{aligned} e_v &= \frac{Z_{uv}}{Z_{uu}} e_u \\ e_w &= \frac{Z_{uw}}{Z_{uu}} e_u \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.37)$$

(2.37) 式における Z_{uv}/Z_{uu} , Z_{uw}/Z_{uu} は v 相, w 相巻線の u 相巻線に対する結合係数である。この結合係数は (2.37) 式よりそれぞれ巻線の誘導電圧の印加相巻線の電圧に対する比より求めることができる。すなわち。

$$\left. \begin{aligned} \frac{Z_{uv}}{Z_{uu}} &= \frac{e_v}{e_u} \\ \frac{Z_{uw}}{Z_{uu}} &= \frac{e_w}{e_u} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.38)$$

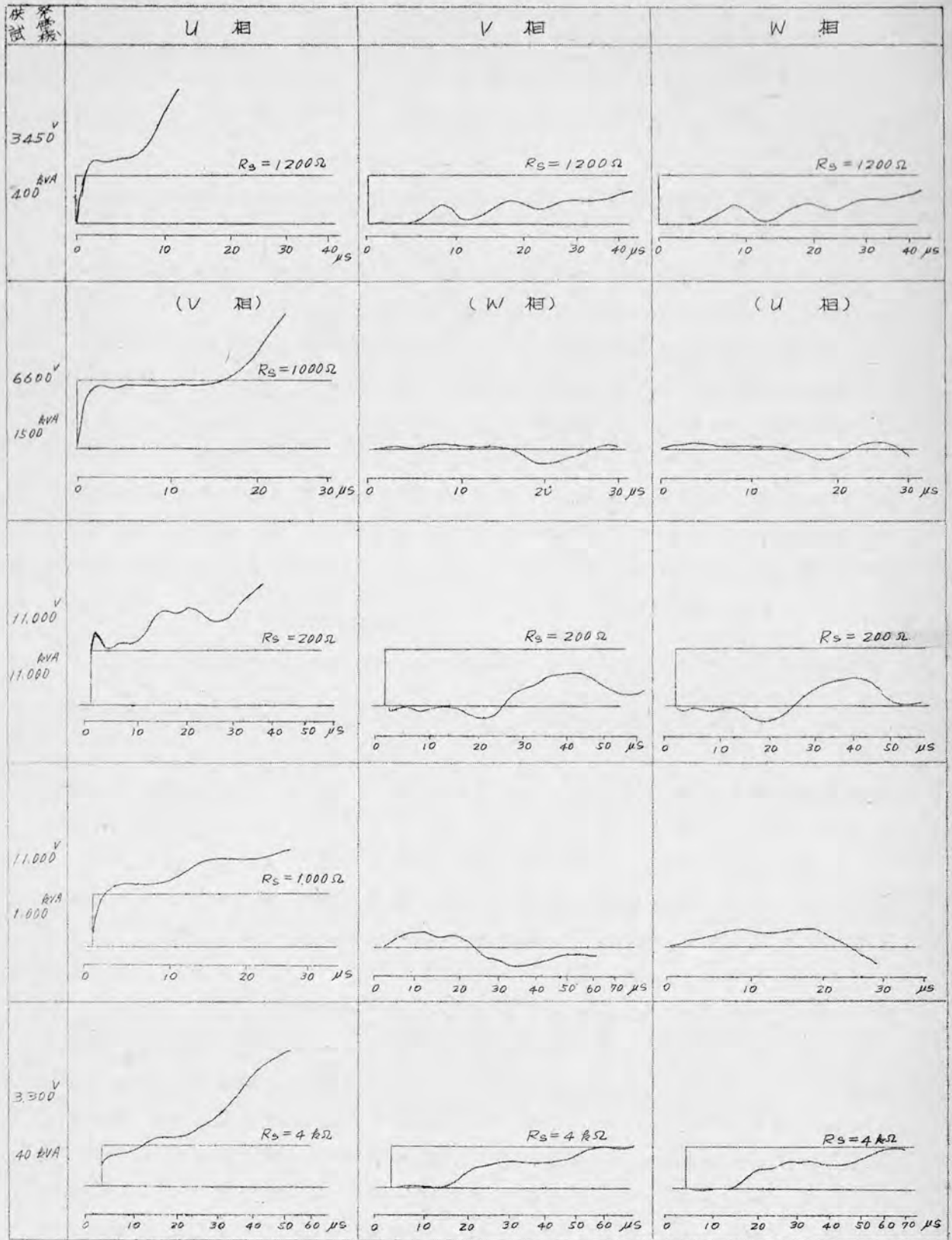
(2.38) 式の結合係数の考え方を各相の過渡インピーダンス測定時の他相の回路に誘起する電圧に適用すると, 第二京大法の測定より結合係数を求めることができる。回転子がない場合の誘導電圧を示したのが, 第2.9図である。第2.9図より各巻電機の固定子巻線の結合係数を求めたのが第2.9表である。

第 2.9 表

供 試 機	Z_{uv}/Z_{uu}	Z_{uw}/Z_{uu}
400 kVA	0.02	0.02
1,500 kVA	0.09	0.09
11,000 kVA	0.1	0.1
1,000 kVA	0.19	0.19
40 kVA	0.04	0.04

第2.9図および第2.9表から個々の巻電機の各相巻線の相互波動インピーダンスを知ることができる。それを示したのが第2.10表である。なおそれぞれの巻電機の巻線法を示しておいた。

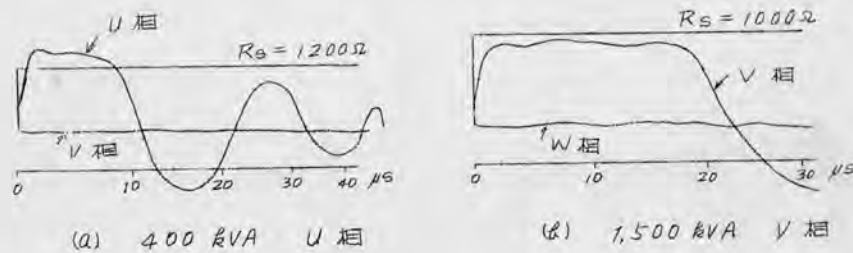
第2.9図 Pケースに於ける各発電機の他相への誘導波形



第 2.10 表

供試発電機 (kVA)	相互波動インピーダンス(Ω)			巻線法
	U-V間	U-W間	V-W間	
400	26	26	26	單層、鎖形巻
1,500	32	32	32	全上
11,000	12.6	19	19	二層、重ね巻
1000	230	230	230	全上
40	128	128	128	全上

以上測定結果より各相巻線の結合係数を求めたが、その内400kVA, 1,500kVAの結合係数は小さい。このことは線輪が溝を隔てて位置しているため、過渡時には鉄心を貫ぬく磁束が極めて少く、したがって巻線間の相互誘導係数が無視できる程度のものであることである。第2.9図はU相の終端を開放した場合のオッシログラムであるので、終端を短絡した場合の400kVA, 1,500kVAのオッシログラムを示したのが第2.10図で、このオッシログラムからも巻線間の結合係数が小さいことを知る事ができる。

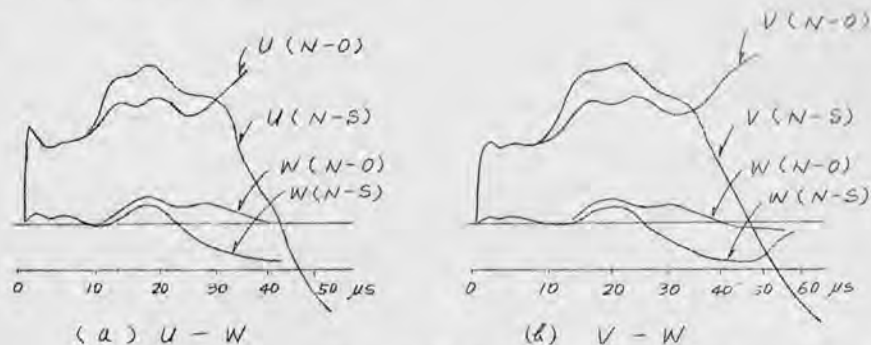


第2.10図 終端短絡した時の過渡インピーダンス
と他相への誘導波形

11,000kVA発電機の巻線法は第1章, 2.2.1項において述べた如く二層、重ね巻線分で分数巻、隔極接続法で二重星形結線である。したがって、各相線輪は第1章第1.34図の展開図を参照により知る如く、溝中に同相の線輪が納められている場合のみでなく、他相の線輪と上コイルあるいは下コイルとなつて納まつている。それ故に溝の中の線輪間で静電的、電磁的に結合している。今U相に電圧を印加すると、1番目の線輪はV相の2番目の線輪と同一溝中に納まつている。また前述した分岐線と反対側に巻かれているのはU相の3番目とV相の1番目の線輪とが同一溝に納まつている。U相とW相とは出力端子（この実験では始端）側に近い所で調べると、U相の4番目とW相の1番目またU相の1番目の線輪とW相の4番目の線輪が同一溝に納まつている。したがって、当該発電機では單層、鎖形巻線の場合より結合係数が大きくなることを知る。第2.9図の誘導波形は終端を開放した時であるので、終端を短絡した時のをあわせて、わかり易く図示したのが、

第2.11図である。このオシログラムから、終端の条件は侵入波が侵入して10 μ s以上経過して現われて来るのがわかる。

ここで論じているのは10 μ s迄のこと。それ以後の現象は本章の第2.3節で述べることにする。



- (a) U-W
- (b) V-W
- $U(N-O)$: U相の終端を開放した時のU相の過渡電圧
 $U(N-S)$: " 短絡 "
 $W(N-O)$: U相またはV相の終端を開放した時の誘導電圧
 $W(N-S)$: " " 短絡 "
 $V(N-O)$, $V(N-S)$ は $U(N-O)$, $U(N-S)$ に同じ

第 2.11 図

1,000 kVAの発電機は二層、重ね巻、整数巻巻、短節巻であるので、前述した11,000 kVA発電機と同様、薄中には同相の線輪が常に納まるとはかぎらず、他相の線輪と同一溝に納まることがある。これは第1章第1.3.9図の展開図より知ることができる。すなわち、U相の始端より2番目の線輪とV相の始端より1番目の線輪、U相の3番目とV相の2番目とが同一溝に納まっている。またV相とW相との関係はU相とV相と同様である。1相分30本の線輪が15本が隔極接続で巻かれ、残り15本が折り返し隔極接続で巻かれており、1番目の線輪と同相の16番目の線輪とが同一溝に納まっている。第2.9図に図示した如く当該発電機の場合は各相間の相互誘導が極めて他の発電機に比して大きい。

40 kVAの発電機の巻線の展開図は第1.44図に図示した通りで、出力端子に近い線輪の配置について調べると、U相の出力端子より1番目の線輪とV相の出力端子より2番目の線輪、U相の2番目の線輪とV相の3番目の線輪が同一溝に納まり、各極同じ状態になっている。またV相とW相とが同様の線輪配置になっている。W相の1番目の線輪とU相の5番目の線輪、W相の2番目の線輪とU相の6番目の線輪とが同一溝内に納まっている。

各相巻線とも1番目の線輪と13番目の線輪導体が同一溝に納まっておりこの点、11,000 V、1,000 kVA発電機と類似している。

以上各発電機について、線輪の配置を調べたが、要するに発電機の各相巻線は送電線における多導線系回路のように各導線が並行し、誘導係数相互イ

インダクタンスが一様に分布しているのではなく、各極とも電気角度 120° の間隔をもつて溝内に納まっているので、単層巻では誘導係数がいろいろと考えられるし、二層巻では同一溝内において各線輪導線間に結合係数をもっているが、巻線としてみれば、均一に分布しているのではなく、局部的である。各相巻線間の相互インダクタンスは第2.9図の他相への誘導電圧からみて、極めて小さいし、各展開図の線輪の配置によつてそれぞれ異なってくるのがわかる。

次に溝内の線輪導線の電流方向を調べてみる。

単層、鎖形巻巻線は溝内に線輪導線が1本であるので、鉄心を通しての電磁的結合は考えられる。今電流の流れの方向を $1,500$ kVA巻電機について調べた。(第1.30図に矢印をもつて電流の方向をしめした。) 同相線輪は巻線の誘起電圧がベクトル和となるように巻いているので、同相線輪の電流の方向は一致する。各相とも電流方向は同方向である。ただ、各相の位置の取りかから、(すなわち、誘起電圧が平衡した三相交流電圧となるよう) 第1.30図のように見掛上一相だけが逆に流れている。

二層、重ね巻巻線について調べてみる。まづ 11 kV、 $15,000$ kVAの固定子巻線の一部を取出し、各相の始端(出力端子)より電流を流入した時の流れの方向をしめしたのが、第2.12図である。

溝内における線輪導線の電流方向が同一方向をとるのは同相の線輪が溝に納まっている場合であつて、相が異なる線輪が同一溝に納まっている溝内の各線輪導線の電流方向は互に反対方向になつてゐる。したがつて、前者においては溝内の相互インダクタンスの符号は正をとり、後者の場合は負の符号をとる。それ故に同相線輪間の相互インダクタンスは正の符号、異相の線輪間では負の符号となる。Rケースの汲動インピーダンスがPケースの $\frac{1}{3}$ より少くなることを知る。当該巻電機は短節、分布、分数溝巻で隣接接続法を採用している。

さらに、第1章の展開図において各相線輪の電流方向を調べると、分布、短節巻、分数溝巻においては 11 kV、 $15,000$ kVAと同様に溝内の線輪導線の電流方向が同一方向の場合は同相線輪が納まっている場合で、互に方向が反対の場合は異なる相の線輪が納まっている場合である。

6.6 kV、 4375 kVAのように(第1.24図参照)、分布、短節、整数巻線の場合はすべての溝は同一相の線輪導線であり、電流の方向は一致している。

以上線輪の配置より相互誘導について述べたが、同相の線輪の相互誘導は正の符号をとり、異相の線輪間においては負の符号をとる。

三相一帯として断位電流を流入した所内と同一相の線路に電流は
多相電流方向が一致して流入するものと見做される。

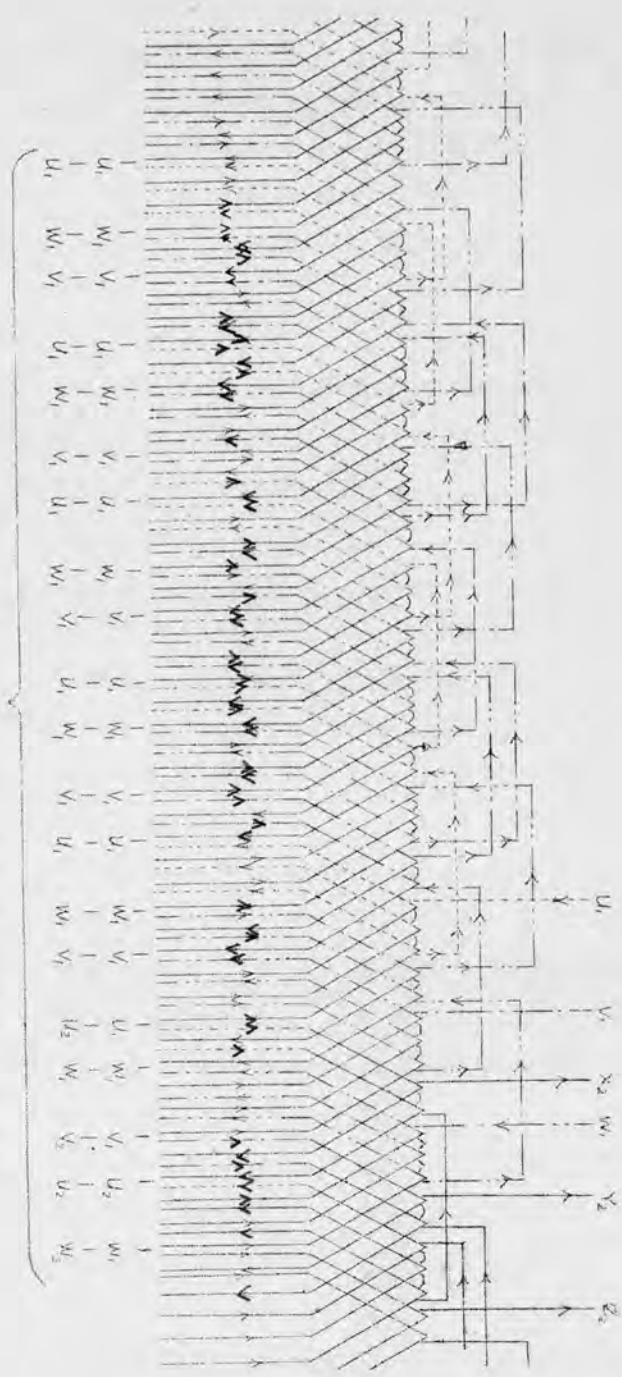


図 2.12 11kV, 15000kVA の巻線の分岐施設の断位における電流方向。

2.2.3 考察の総括

巻電機の過渡波動インピーダンスより初期の波動インピーダンスを求め、多層線系回路の理論を駆使して巻線の波動性に検討を加えた結果、次の結論を得た。

1. 単層巻電機の各相巻線は構造上から来るのであるが、各相巻線間の誘導係数、および相互インダクタンスが初期においては無視されるので、各相は絶縁された単一線路として見做される。
2. 二層巻電機の各相巻線は単層巻電機とほぼ同様に単一線路とみなされ

るが、線輪の配置によつて溝内には他相線輪と納まる時は、相間の相互インダクタンスが局部的に効いて来る。

3. 溝内に同相線輪が納まっている時の相互誘導は正の符号をとる。異相線輪が納まっている時の相互誘導は負の符号をとる。
4. 各相巻線間の相互誘導結合が小さい場合においては各相巻線は単一回路と見做すことができる。
5. 二層、分布巻において、同相線輪がすべて同一溝に納まっている場合は同相内の線輪間の相互誘導のみを考えればよい。
6. 過渡波動インピーダンスの初期においては鉄心を通しの相互インダクタンスが小さい。これは鉄心内の表皮効果による。

8 2.3. 固定子巻線の過渡波動インピーダンスについて。

第2.2節では過渡波動インピーダンスの初期における波動インピーダンスを求め、多巻線系回路の理論を適用して論じた。本節においては過渡波動インピーダンスの波形を分類し、過渡波動インピーダンス波形に及ぼす巻線方式について述べる。はじめに初期の波形について解析することにした。

2.3.1. 過渡波動インピーダンス波形の形による分類

固定子巻線の過渡インピーダンスは始端において単位電流を流入した時、第1回の反射波が始端に帰つて来る迄の波形を以つて表わされる。

第2.2節に掲載した過渡インピーダンス波形をその形から大別すると二通りとなる。すなわち、終端よりの反射波が始端に帰つて来る迄、

- (1) 過渡インピーダンス波形が大体平滑なもの。
- (2) 過渡インピーダンス波形の中頃（波頭が終端に到達したと考えられる時同）から反射波が始端に到達する迄凸部を生ずるものとなる。過渡インピーダンス波形が大体平滑な波形を示しているのは400 kVA, 1,500 kVA, および4,375 kVAの発電機である。また過渡インピーダンス波形に凸部を生じているものは、17,000 kVA, 1,000 kVA, 15,000 kVA および40 kVA 発電機である。

2.3.2 過渡波動インピーダンスに及ぼす巻線方式の影響について。

発電機の巻線方式ならびに供試発電機の展開図は第1章第1.4節に詳細しておいた。したがつて、本章において考察中の発電機の巻線の展開図を参照し、巻線方式より来る過渡インピーダンス波形への影響について検討することにする。

1. 400 kVA, 1,500 kVA 発電機は単層、鋸形巻巻線であり、したがつて、第1.36図および第1.30図の展開図の如く、各線輪はそれぞれの溝に納められている。したがつて、第2.2節において述べた如く、各相巻線間の結合係数が極めて小さく、特に単位電流が侵入した初期においては鉄心の表皮効果により鉄心を通る磁束が少く、結合係数が無視される。

また、同様に同相間の線輪の相互誘導も極めて小さいものと考えられる。
 それ故に第2.2節の結論通り、單層、鐵形巻の一相分の巻線は單一回路と
 考えられるので、変動インピーダンスは時間に対し一定となる。すなわち

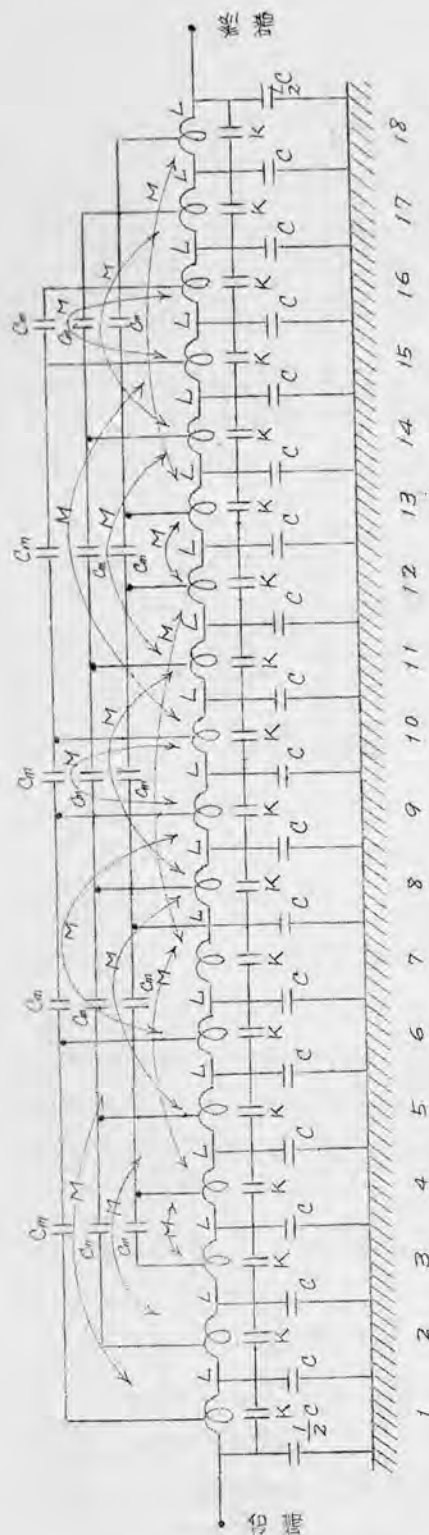
$$Z(t) = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{であらわされる。}$$

2. 4,375 kVA (6.6 kV) 巻電機は二層、重ね巻巻線であるが、短筋
 巻隣極接線法であるので、

その巻線線輪の展開図は第
 1.24図に示した通りに、
 同相の隣極の線輪が同一溝
 内に上コイル、下コイルと
 なつて納まつている。した
 がつて、この場合は同相の
 隣極間の線輪は静電的、お
 よび電磁的に結合している
 が、その結合が始端の線輪
 から隣極の始端線輪からら
 番目の線輪と順次各極の同
 相の線輪と溝中で結合し、
 終端に達している。このよ
 うな巻線の等価回路は第2.
 13図で図示される。

この等価回路は初期の部
 分について求めたもので、
 他相巻線については考慮し
 ていない。他相の巻線を考
 慮すると極めて複雑なもの
 となる。また線輪1本の等
 価回路は、梯子型第1種回
 路として考え、この四端子
 回路が継続していると考え
 た。

溝内の線輪互々間の相互
 インダクタンスは前節で逐
 べた通り正の符号をとる。
 線輪間の誘導係数を考えると、
 第2.13図より1つの
 分岐巻線2組の線輪間直



L : 線輪の自己インダクタンス

C : " 対地静電容量

K : " の巻回数

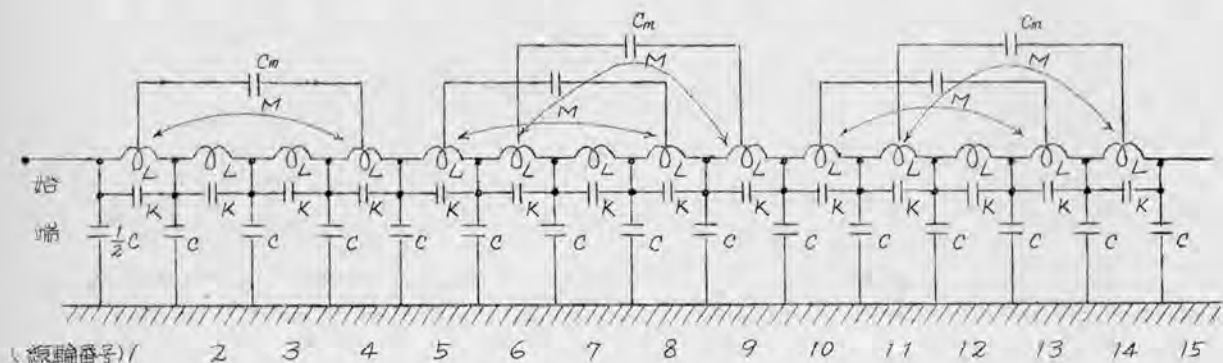
C_m : 線輪間の静電容量

M : " 相互インダクタンス

第2.13図 4,375 kVA 1相分岐巻線の等価回路

列容量をもつた回路が考えられるので、変圧器と類似の過渡変動インピーダンス波形を有していることがわかる。

3. 15,000 kVA は二層、重ね巻、3重星形結線である。第1.27図の展開図を参照し、U相巻線の線輪の配置を調べてみる。今数薄、短節巻隣極接続であるので、各極の同相線輪は隣極の同相線輪と全部が同一溝内に納まつていないので、4375 kVA の巻線の等価回路とは異なつたものである。U相の内1つの分岐巻線の等価回路を図示すると第2.14図となる。この等価回路は1分岐巻線のみであるので、同相でも他の2つの分



L : 線輪のインダクタンス

C : " 対地静電容量

K : " 巻回間静電容量

C_m : 線輪間静電容量 (スロット内に於ける)

M : 線輪間相互インダクタンス

第2.14図 15,000 kVA U相巻線の等価回路

岐巻線、さらには他相の巻線には隔れていない。同一分岐線中の線輪間の相互誘導は4375 kVAの巻線よりは少い。

当該巻線の巻線は前述した如く3重星形結線である。各相とも3分岐巻線が並列になつてゐる。その分岐巻線の内1分岐巻線の始端に近い線輪と他の分岐巻線の終端に近い線輪とが同一溝に納まつてゐる。例えばU相ではU1分岐巻線の始端より3番目の線輪とU2巻線の終端の線輪(始端より40番目)とが同一溝に納まつてゐる。かかる場合には当然静電的、電磁的誘導がある。この誘導電流波および電位波が始端、終端に向つて直行して行くことが考えられる。

- (4) 11,000 kVA は二層、重ね巻、2重星形結線である。第1章第1.34図の展開図より、1相の巻線は前述した通り2つの分岐巻線が並列してゐるもので、それぞれの分岐巻線は隔極接続で右左に巻いてゐる。この2つの分岐巻線間の関係を調べると一方の分岐巻線の始端に近い線輪と他方分岐線の終端に近い線輪とが同一溝に納まつてゐる。それ故に溝内で終端に近い線輪との静電的、電磁的誘導は誘導電位波および電流波として、そ

の分岐巻線の始端及び終端に向って進行しく行く。

- (5) 1,000 μ V A は二層、重ね巻、分岐薄、短節巻巻線、1重星形結線である。第1,39図の当該発電機の巻線断面図より、各相巻線は隔極接続で、上記した如く1重星形結線であるので、折返して線輪を配置して、始端より第1番目の線輪は16番目の線輪と同一溝内にある。3番目の線輪は終端の線輪と同一溝内に納まっている。それ故に1番目の線輪から、16番目の線輪および3番目の線輪から終端線輪への誘導電位波および電流波は始端および終端に向ってそれぞれ進行する。
- (6) 40 μ V A は二層、重ね巻、整数溝巻、1重星形結線である。接続法は隔極接続法で、毎極毎相の溝数は3であり、1相分の巻線は折り返して巻かれている。1相分の導面回路は第1,44図を参照して巻けは取めることができる。

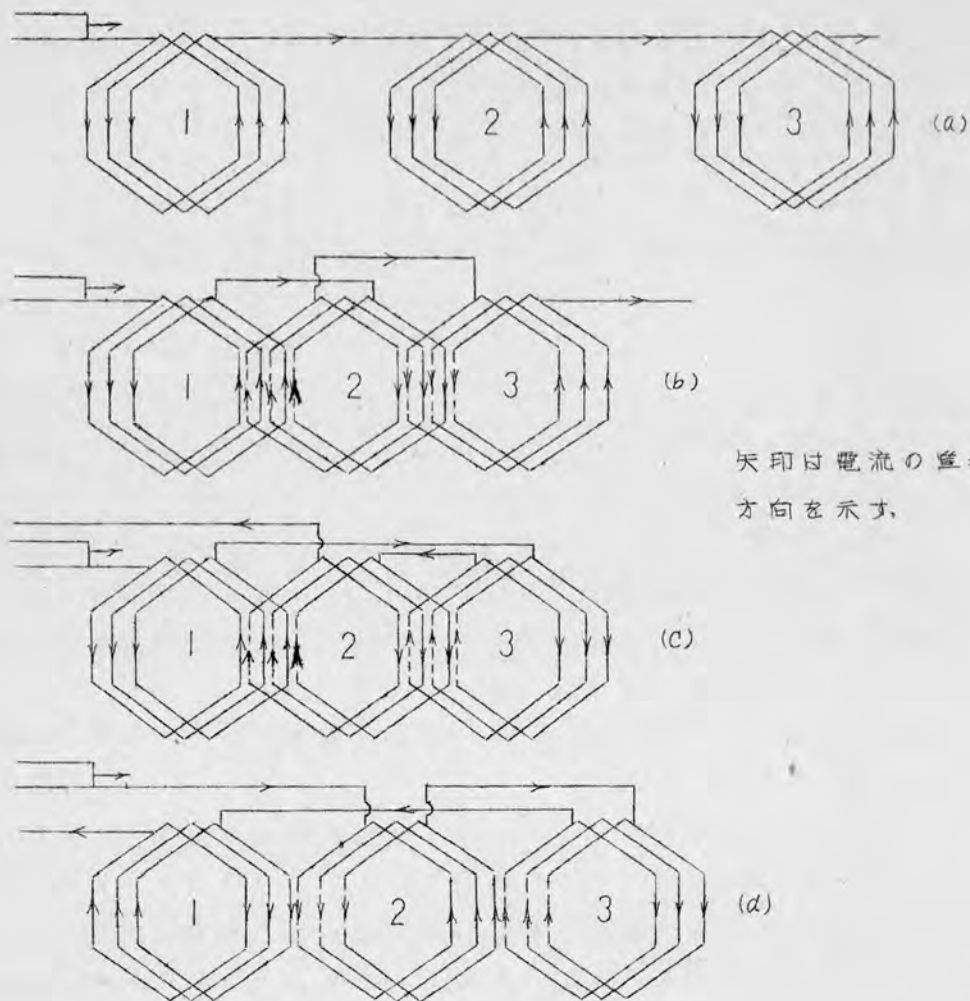
当該発電機は上記した1,000 μ V A 発電機と同様、同相巻線の1番目の線輪と折り返しの最初の最初の線輪（出力端子より13番目の線輪）とが同一溝に納まっている。したがって、上記発電機と類似した線輪配置をしている。

以上個々の伏試発電機の線輪配置について、簡章はものは平均回路を図示して説明したが、要約すると、同相巻線において始端に近い線輪と終端に近い線輪とが同一溝内に納まっているような線輪配置にはなっている場合には、過渡波動インピーダンス波形に凸部を生じている。一方同相の線輪が始端より順次同一溝に納まって、終端に達する二層巻巻線、あるいは層巻巻線においては過渡波動インピーダンス波形は平滑な波形である。

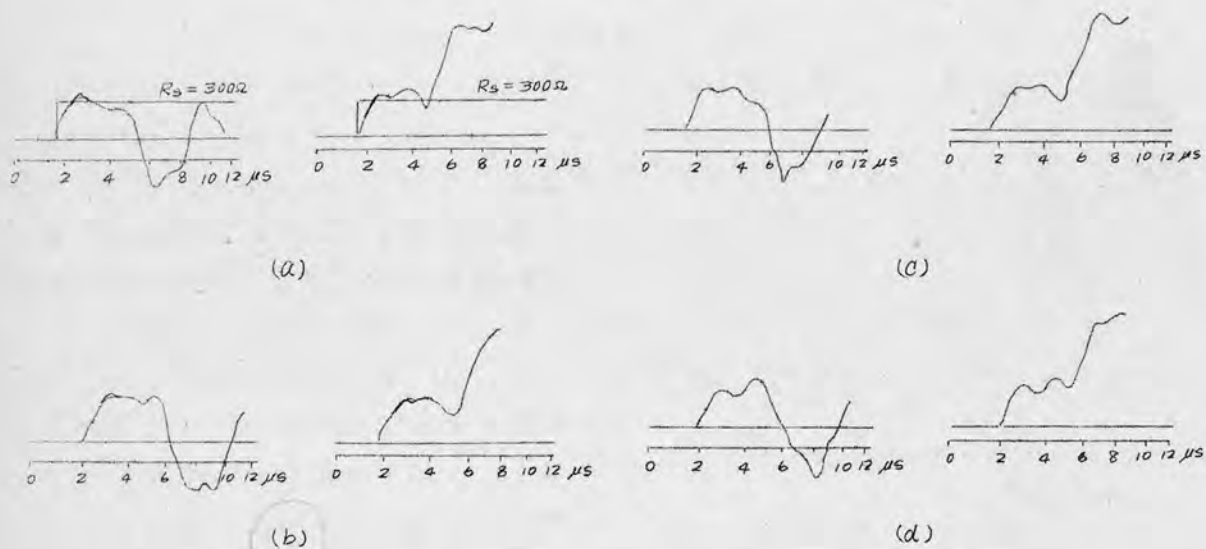
章若は以上の点を確かめるため、巻回数が4回巻、1回巻の巨長が約2.5 μ 、線輪導線の長さが約55 cm の所に溝に納められていることを検察して45 cm だけアルミニウム箔を貼りつけた線輪の半を使用して、第2,15図に示す4通りの線輪配置における各巻線の過渡波動インピーダンスを測定した。測定した過渡波動インピーダンスのオシログラムは第2,16図に示した。これらオシログラムa、b、cおよびdは第2,15図の巻線a、b、cおよびdにそれぞれ対応している各オシログラムは向つて左側は終端を接地した時、右側は開放した時のものである。この測定において直列抵抗を15 μ とし、(2.3)式が成立するようにした。

第2,16図のオシログラムから初期における各波形は同一で、初期の波動インピーダンスは330 Ω である。入来電流波が進行するにつれて、各巻線の波動インピーダンスは異なっていることがわかる。また終端を接地した時と、開放した時とでは入来波が終端で反射し、反射波が始端に到着する迄の間の波動インピーダンスは異なっている。以下実験結果について考察すると次の通りである。

1. 単一回路の波動インピーダンスは(2.39)式（この式は第2,4節で



第2.15図 線 輪 の 配 置 図



第2.16図 巻線の過渡波動インピーダンス
オシログラム。

述べる)であらわされる。

$$Z(t) = \sqrt{\frac{L}{C}} \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{R}{L} - \frac{G}{C} \right) t \right\} \quad (2.39)$$

誘電体巻線では(2.39)式の第2項による影響より巻線中の線輪間および線輪グループ相互間の相互インダクタンスが波動インピーダンスに影響を与えている。入来波が終端に向つて進行する時には図はグループ内の線輪間において、相互インダクタンスが正の符号をとつて効いている。図ではさらに、他のグループの線輪との間に正の符号の相互インダクタンスが効いている。図においては2のグループと3のグループとの線輪間に負の符号で相互インダクタンスが作用し、1のグループと2のグループとの線輪間では正の符号で効いている。図ではグループ間の線輪相互は正の符号で効いている。

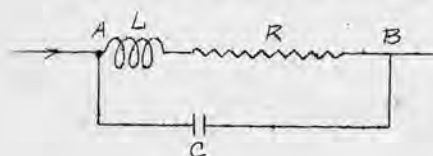
終端を接地すると、反射電流波は入来波と、符号、大きさとも同一であるので、反射電流波は入来波の時と逆に相互インダクタンスは作用するし、終端を開放した時は反射電流波は入来波と符号を異にし、進行方向が逆になるので、入来波の進行と同様に相互インダクタンスは作用する。したがつて、終端条件によつて過渡波動インピーダンスが異なることは理解されたと思う。

このように二層巻々線では同相巻線内の線輪相互間の相互インダクタンスが、線輪の配置により、複雑になるし、また終端条件によつても相互インダクタンスの作用が異なつて来るので、巻線の波動インピーダンスは初期において求めることが必要である。また従来巻線の伝播速度を第二京大法または電圧降下法を用いて測定しているが、第2.15図のオシログラムからわかるように反射波の到達点を求めることは極めて困難である。

2.3.3. 過渡波動インピーダンスの初期値について

第二京大法により誘電体巻線の過渡波動インピーダンスを測定した時、その初期において突起を生ずる場合もあり、また滑らかな曲線になる場合もある。この理由について考究する。過渡波動インピーダンスの初期の波形を考察するに當つて、まづ単位電流波が固定巻線の端子に到達した時には、最初の線輪の突効インダクタンスおよび対地静電容量の一部と巻線の波動インピーダンスが第2.17図に示した等価回路としておかれていゝと考える。

次に入来電流波が巻線中を進行するにつれて、鉄心の表反効果等が~~波~~あらわれて来ることも考慮する必要がある。



第 2.17 図

1. 第2.17図の等価回路に対する考察

第二京大法は、単位電流を流入し、そのレスポンス電圧を測定するのであるから、単位電流 $I(t)$ を流入した時の、

第 2.17 図の回路のレスポンス電圧は次式であらわされる。

$$V(p) = \frac{Lp + R}{LCp^2 + RCp + 1} H(t) \quad (2.40)$$

さらに (2.40) 式は (2.41) 式の如く書くことができる。

$$V(p) = \frac{1}{C} \cdot \frac{p}{p^2 + \frac{R}{L}p + \frac{1}{LC}} H(t) + \frac{R}{LC} \cdot \frac{1}{p^2 + \frac{R}{L}p + \frac{1}{LC}} H(t) \quad (2.41)$$

(2.41) 式において、

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{R}{2L} \\ \beta &= \frac{1}{\sqrt{LC}} \\ \omega &= \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \end{aligned} \right\} \quad (2.42)$$

とする。

(2.41) 式の t -函数を求めると下記の通りになる。

i) $\beta^2 > \alpha^2$

$$\begin{aligned} v(t) &= \frac{1}{C\omega} e^{-\alpha t} \sin \omega t H(t) + \frac{R}{LC} \cdot \frac{1}{\beta^2} \left\{ 1 - \frac{\beta}{\omega} e^{-\alpha t} \sin(\omega t + \varphi) \right\} H(t) \\ &= \frac{1}{C\omega} e^{-\alpha t} \sin \omega t H(t) + R \left\{ 1 - \frac{\beta}{\omega} e^{-\alpha t} \sin(\omega t + \varphi) \right\} H(t) \end{aligned}$$

$$= \left\{ \frac{1}{C\omega} \sin \omega t - \frac{R\beta}{\omega} \sin(\omega t + \varphi) \right\} e^{-\alpha t} H(t) + RH(t) \quad (2.43)$$

$$\text{但し } \varphi = \tan^{-1} \frac{\omega}{\alpha}$$

ii) $\beta^2 = \alpha^2$

$$\begin{aligned} v(t) &= \frac{1}{C} \cdot t e^{-\alpha t} H(t) + \frac{R}{LC} \cdot \frac{1}{\alpha^2} \left\{ 1 - e^{-\alpha t} (1 + \alpha t) \right\} H(t) \\ &= \frac{R}{LC} \cdot \frac{4L^2}{R^2} H(t) + \left\{ \frac{t}{C} - (1 + \alpha t) \frac{R}{LC} \cdot \frac{4L^2}{R^2} \right\} e^{-\alpha t} H(t) \end{aligned}$$

$$= \left\{ \frac{4L}{RC} (1 - e^{-\alpha t}) - \frac{t}{C} \cdot e^{-\alpha t} \right\} H(t) \quad (2.44)$$

iii) $\beta^2 < \alpha^2$

$$v(t) = \frac{1}{C} \cdot \frac{1}{n-m} (e^{-mt} - e^{-nt}) H(t) + \frac{R}{LC} \cdot \left\{ \frac{1}{\beta^2} - \frac{1}{n-m} \left(\frac{e^{-mt}}{m} - \frac{e^{-nt}}{n} \right) \right\} H(t)$$

但し $p^2 + \frac{R}{L}p + \frac{1}{LC} = 0$ の 2 の実根を m, n とする。

$$= \frac{1}{n-m} \left\{ \left(\frac{1}{c} - \frac{R}{Lcm} \right) e^{-mt} - \left(\frac{1}{c} - \frac{R}{Lcn} \right) e^{-nt} \right\} H(t) + R H(t) \dots (2.45)$$

したがって、強制電流を巻電機線輪に流入した時、初期のインピーダンスは(2.43)式、(2.44)式および(2.45)式より求めることができる。(2.42)式より $\alpha = \beta$ とすると、

$$\frac{R}{2} = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

となり、巻線の波動インピーダンスは $\sqrt{\frac{L}{C}}$ で、 R は巻線の波動インピーダンスであるので、上式が成立することはなく、 $\frac{R}{2} < \sqrt{\frac{L}{C}}$ となる。したがって、常に $\alpha < \beta$ の条件のみとなる。

2. 計算例

i) (2.43)式に R, L, C の数値を下記の通りとする。

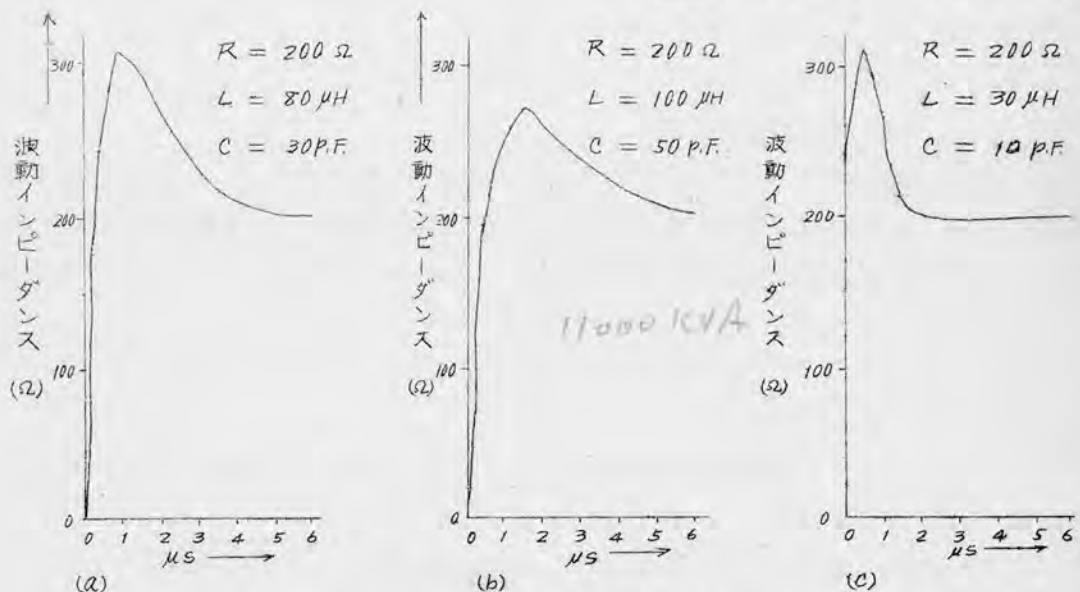
$$a \begin{cases} R = 200 \Omega \\ L = 80 \mu H \\ C = 30 pF \end{cases} \quad b \begin{cases} R = 200 \Omega \\ L = 100 \mu H \\ C = 50 pF \end{cases} \quad c \begin{cases} R = 200 \Omega \\ L = 30 \mu H \\ C = 10 pF \end{cases}$$

計算した結果は第2.18図に示す。巻線の侵入静電容量などの程度考えるべきかということ、第二京大法で実測したオッシログラムの内、

第2.11表 巻電機巻線の侵入容量

定格電圧 (kV)	巻電機の容量 (kVA)	供試相	侵入容量 (pF)
3.45	400	U	12
6.6	1,500	V	16.5
11	1,000	U	26

波頭部分が比較的よく撮影されているオッシログラムより波頭の立上りの曲線を指数関数の曲線と考えて求めたのが第2.11表である。上記の C の値は第2.3図、11,000 kVA に対して選定したもので、第2.11表



第2.18図 (2.43)式の数値計算例

の発電機より容量が大きいので幾分大きいものとした。

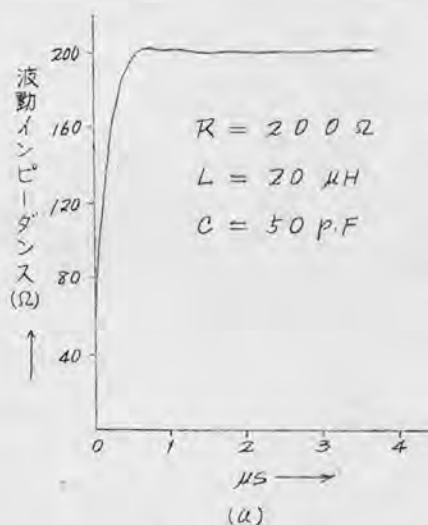
またLは第2.3図のオシログラムに合致するように、特に $\beta > \alpha^2$ にはるようにした。Rは11,000 Ω V A 発電機の波動インピーダンスが230 Ω であるので、それに近い200 Ω を採用した。

第2.18図の計算例の内(a)図が第2.3図U, W相の過渡波動インピーダンス波形の初期の波形に類似している。大きさの方からは(b)図が大体一致している。V相のインダクタンスは前述した如く、U, W相のものより相互インダクタンスが加わるだけ大きい。したがって、第2.18図(c)のように波頭となるのであるが、測定した過渡波動インピーダンスの初期は第2.3図の見る如く、突起が出ていない。これは波頭の立上りが急峻であるため測定されていないためとも考えられる。そのときはV相の波頭は第2.3図のような波形とし撮影される。

$R = 200 \Omega$, $L = 20 \mu H$, $C = 50 pF$ のときの波形を(2.43)式より求めると、第2.19図となる。さらに、Lを小さくすると波頭の突起はなくなつてくる。

以上計算例より、波頭に突起が生じたり、波頭が指数函数の曲線をなすことが理解される。

発電機の巻線は衝撃波に対してはその波動インピーダンスに等価な抵抗Rをもつて扱われているが、実は最初の1ターンの対地静電容量とインダクタンスが作用していることがわかり、また計算結果より発電機巻線は波動インピーダンスに等価な抵抗をもつて扱われることが理解される。



第2.19図

3. 鉄心内の表皮効果

回転子がない状態においては測定した過渡波動インピーダンス波形の初期の形状から、鉄心の表皮効果と考えられるものを的確に見出しえないが、第3章の各過渡波動インピーダンス波形と本章の波形を比較すると、回転子がある時の波頭は円味を帯びている。これは鉄心の表皮効果によるものと考えられる。

8.2.4 波頭の減衰、変歪および伝播速度

本節においては進行波が巻線を進行する時の波頭の減衰、変歪および伝播速度について論ずることとする。

さきに発電機巻線は単一回路として大体内取り扱うことを述べ、さらに送電線と異なる点は初期の部分と終端における反射点にあることを述べたので、初期

と終端における反射が生じるまでの間について単一回路の送電線に使用する過渡波動インピーダンスの式を用いて、考察を加えてみることにする。

単一回路の始端に $\phi > 0$ に対して単位電流を強制的に流し込むと、始端における対応電圧 $E(p)$ は次式であらわされる。

$$E(p) = \sqrt{\frac{Lp+R}{Cp+G}} \quad (2.46)$$

(2.40) に対応する時間函数 $e(t)$ は、

$$e(t) = \frac{1}{2\pi j} \oint_{C-j\infty}^{C+j\infty} \frac{1}{p} \sqrt{\frac{Lp+R}{Cp+G}} e^{pt} dp \cdot H(x)$$

となる。 $t=0$ の近傍の $e(t)$ の値を求めると

$$e(t) = \sqrt{\frac{L}{C}} \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{R}{L} - \frac{G}{C} \right) t + O(t^2) \right\} \quad (2.47)$$

となる。 $e(t)$ と同点の電流の比が過渡波動インピーダンスであるが、電流は単位電流なるため、(2.47) 式は始端における過渡波動インピーダンスとなる。すなわち、

$$Z(t) = \sqrt{\frac{L}{C}} \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{R}{L} - \frac{G}{C} \right) t + O(t^2) \right\} \quad (2.48)$$

(2.48) 式中 $\frac{1}{2} \left(\frac{R}{L} - \frac{G}{C} \right)$ は保波形条件を与える式であつて、

$$\sigma = \frac{1}{2} \left(\frac{R}{L} - \frac{G}{C} \right) = 0 \quad (2.49)$$

が成立する時は保波形の状態、すなわち波頭に歪歪がないことになる。このときの波動インピーダンスは $\sqrt{\frac{L}{C}}$ で与えられる。

第2.1図、第2.2図、第2.3図、第2.5図、第2.6図、第2.7図および第2.8図の過渡波動インピーダンスを時間の至適と共に $\frac{R}{L} > \frac{G}{C}$, $\frac{R}{L} < \frac{G}{C}$, $\frac{R}{L} = \frac{G}{C}$ のいずれであるかを調べると、大体において $\frac{R}{L} = \frac{G}{C}$ の傾向をもっているが、

1,500 kVA, 11,000 kVA, 1,000 kVA および 40 kVA では部分数には時間と共に波動インピーダンスが増したり減少したりしている。ある時間に対しては $\frac{R}{L} > \frac{G}{C}$, $\frac{R}{L} < \frac{G}{C}$ とが考えられる。これは、第2.3.2項に述べた同相巻線中の線輪間の相互インダクタンスの影響と考える。したがつて、過渡波動インピーダンス $Z(t)$ から波頭の変歪、すなわち保波形条件を見出すことは困難である。尚表皮効果に伴う渦流損が考えられるが、どの程度効いているのか測定したオシログラムからはつきりしない。

次に、送電機線輪の G/C であるが、シエリング、ブリッジで測定した結果を示すと第2.12表の通りである。供試線輪は新品のもので、使用出来るように乾燥を十分行つたものである。

送電機巻線の R/L は竹内氏著、電気機器設計学の設計例より求めると、31.1 となり、第2.12表の G/C の値と比較すると、 G/C は R/L に比して小さいので無

視できる。 R/L は 50∞ に対するものである。同波数が高くなると巻線の異効抵抗は同波数の平方根に比例して増し、異効インダクタンスは同波数の平方根に比例して減少するので R/L は上記の値よりさらに増大するので、 G/C は R/L に比して小さく無視しても差支えない。したがって (2.49) 式は成立しないので進行波の波頭の変歪がある。

第 2.12 表

温度 (°C)	G/C	
	11 kV 級線輪	66 kV 級線輪
19	1.73×10^{-4}	3.72×10^{-4}
60	4.9×10^{-4}	8.35×10^{-4}
100	5.0×10^{-3}	3.38×10^{-2}

2.4.1. 波頭の減衰および変歪

波頭部分の減衰は $e^{-\rho t}$ であらわされる任意の点の進行波の振巾の最大値は $e = E e^{-\rho t}$ であらわすと、時間 t_1 における進行波の波高値を e_{t_1} , t_2 の時の波高値を e_{t_2} とすると、減衰係数 ρ は次式であらわされる。すなわち

$$\rho = \frac{e_{t_1} - e_{t_2}}{e_{t_1}} / (t_2 - t_1) \quad (2.50)$$

巻線の過渡波動インピーダンスオシログラムより巻線の減衰係数を求めるには (2.43) 式を用いる。すなわち、終端を接地した時の過渡波動インピーダンスオシログラムのレスポンス電圧の最大電圧 e_i と1番目の谷の電圧の最大値 e_r とを (2.43) 式に代入して、その時間内における巻線の減衰率 $\frac{e_i - e_r}{e_i}$ を求める。かくして求めた巻線の減衰率は附録第2.2表、第2.4表、第2.8表、第2.14表、第2.15表および第2.16表に示した。この結果 15,000 kVA 発電機を除いた発電機巻線の減衰率は0.2より大きい値である。15,000 kVA 発電機の減衰率が小さいのは反射波の始端に到達したことを他の発電機の場合より明瞭に知ることが出来ることから推察できる。

求めた減衰率は0.2以上の値で、特に三相一括したRケースにおいては、各発電機とも減衰率が大である。その理由は次の如く考えられる。

一般に送電線では減衰係数 ρ は次式であらわされる。

$$\rho = \frac{1}{2} \left(\frac{R}{L} + \frac{G}{C} \right) \quad (2.51)$$

線輪は鉄心中にあるので (2.44) 式中の抵抗 R は表皮効果のため増し、インダクタンス L は減少する。すなわち、~~交流の~~ ^{高周波に対する} 異効抵抗はその周波数の平方根に比例して増大し、一方異効インダクタンスは周波数の平方根に逆比例して減少する。

鉄心中の表皮効果に伴う渦流損失^⑮ およびヒステリシス損失の異効抵抗の増大については、林、奥田両氏の論文^⑮が発表されている。この論文より、溝中の導線の異効抵抗の増大は知ることが出来る。

2.4.2. 波頭の伝播速度

送電線における波頭の伝播速度は2倍の線路長を過渡波動インピーダンス波形において単位電流を流入してから、第1回目の反射波が始端に到着する迄の時間で割った値である。送電線の場合は反射波が始端に到達したことがオッシロの上で明瞭であるが、巻電機巻線においては甚だ不明確である。また終端条件を接地、開放と変えて測定した過渡波動インピーダンスオッシログラムから反射点を求めることは極めて困難である。その理由については

1. 鉄心中の残反効果による波頭の減衰および変歪が大きい。
2. 巻線方式および接続法から来る同相線輪間の相互誘導による過渡波動インピーダンスに凸部が生ずる。

この二つの理由により終端よりの反射波の到達時間が明瞭でない。本項において伝播速度の求め方と進行波の伝播速度について述べる。

1. Boehme 氏の伝播速度の求め方⁽¹⁾

巻線の始端に衝撃電圧を印加、終端を接地しておく、終端では入来波と符号反対の波が反射波となつて始端に帰る。進行波が巻線を一往復すると、一同期の電圧振動が求められる。巻線の長を L_m 、進行波の伝播速度 $v_m/\mu s$ 、周期を $T_{\mu s}$ とすると、次式が成立する。

$$2L = vT \quad (2.52)$$

よつて、

$$v = \frac{2L}{T} \quad (2.53)$$

さらに、線輪端部の伝播速度は溝部の $1/10$ とし、巻線の等価長 L を次式で算出している。すなわち、

$$L = (1.8l + 0.10)N \quad (2.54)$$

ただし、 l は溝部の長さ

l は線輪1回巻の長

N は巻線の全巻回数

かくして求めた巻線の伝播速度は $16.9 m/\mu s$ である。

2. 過渡波動インピーダンスより伝播速度を求める法

第2章大法で測定されたオッシログラムの波形は、二つの部分からなりたっている。すなわち、第1回の反射波が始端に帰つて来る迄の波形はその巻線の過渡波動インピーダンスを与えるもので、その後の振動波形は、巻線の長を $1/4$ 入の弦とした振動とである。

(i) 過渡波動インピーダンスの波形より伝播速度を求める法

層巻、鎖形巻巻線では各相巻線は初期においてそれぞれ独立した単一回路と考えられるが、波頭が変歪してくると各相巻線間また同相巻線の線輪間に相互誘導が働く、したがつて多線系回路として考えられるので、したがつて試験ケースPの過渡波動インピーダンスよりRケース

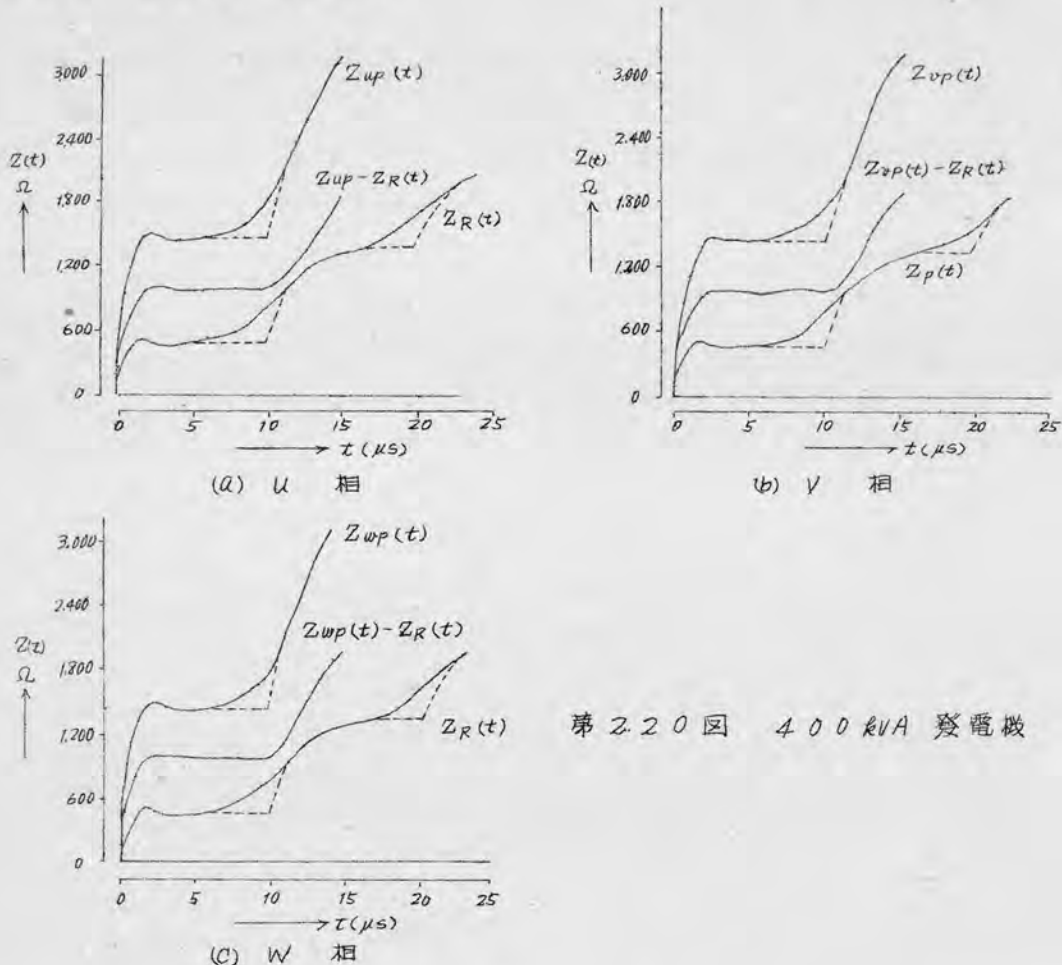
の過渡インピーダンスを差し引いた過渡波動インピーダンスは(2.8)
(2.19) 式より、

$$Z_{up} - Z_R = \frac{2}{3} Z_0 \quad (2.55)$$

となる。

この正相分波動インピーダンスは送電線における線間波とも考えられるもので、波頭の変位が小さいので、この正相分の反射波の到達点は割合明瞭になる筈である。ただ発電機巻線は送電線とことなり、線間波が少く、殆んどが対地波であること、相互インダクタンスの作用および誘導係数が均等に分布しているのではなく、局部的に継続して存在している。

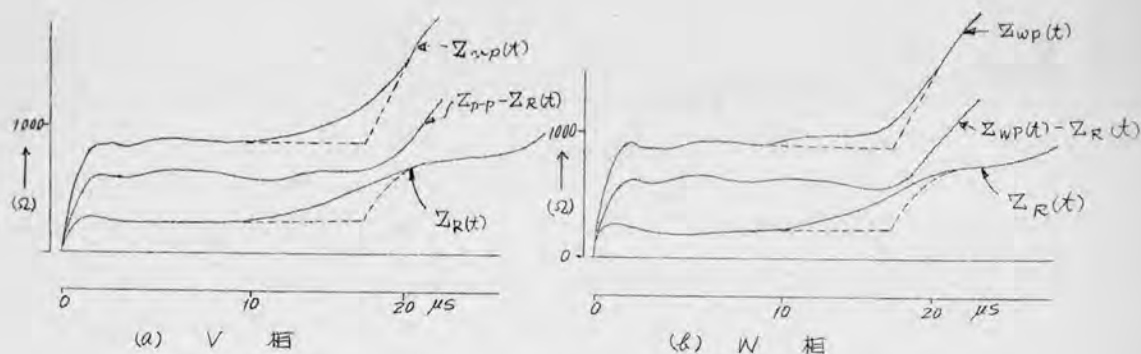
第2.1図の400 kVA発電機のPケース、Rケースの過渡波動インピーダンスを平等時間軸に転写し、その差すなわち $Z_p - Z_R$ を各相について求めたのが第2.20図である。1,500 kVA 発電機に対して求めたのが、第2.21図である。



第2.20図 400 kVA 発電機

第2.20図、および第2.21図より反射波の到達時間を明確に求めることができる。

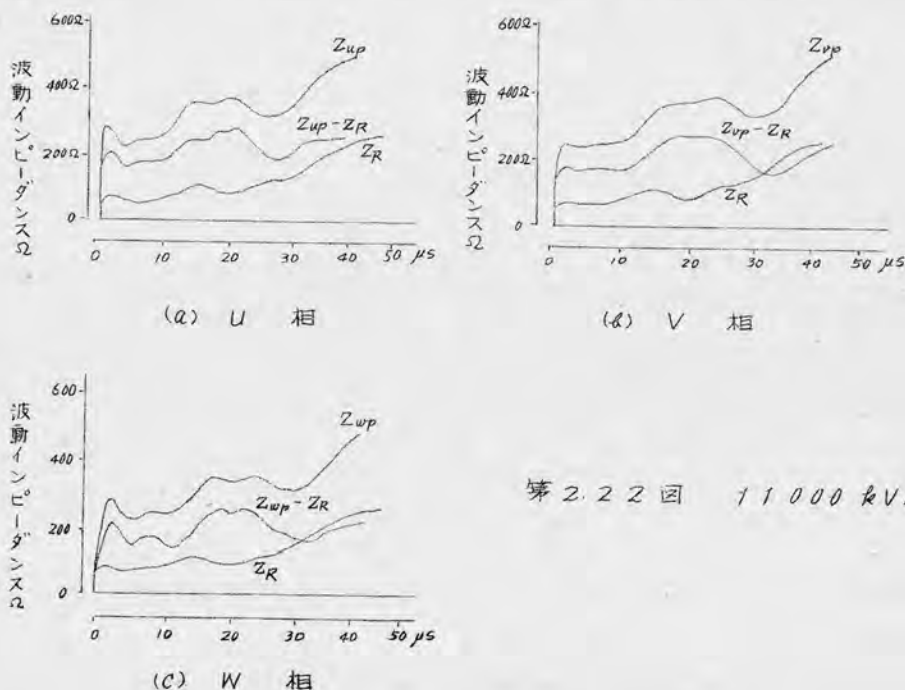
400 kVA 発電機では巻線を往復するに要する時は $10 \mu s$ で、1,500 kVA 発電機では $16 \mu s$ である。



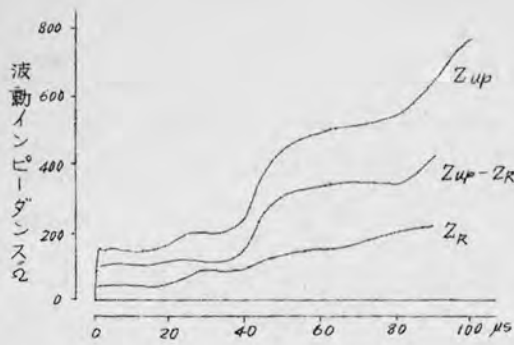
第2.21図 1,500 kVA 発電機

二層、重ね巻線では第2.2節、第2.3節で述べた如く、他相線間、同相線間共に静電的、電磁的結合があるので、単層、鎖形巻線と同様各相巻線は独立した単一回路と見做すことがやや無理がある。この場合最も問題になるのは相互誘導であるが、これは一相巻線の時と三相一括した時では同様に効いている。ただ相互誘導の符号が部分的に異なつて来ることはある。したがって、PケースとRケースの差にはそれぞれ部分的相互誘導の差が残り、反射波が始端に到達した時は単層、鎖形巻線の場合と同相PケースとRケースの反射波による対応電圧の差に急激な変化が生ずることが考えられる。

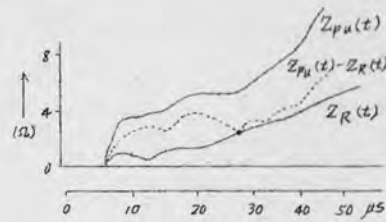
11,000 kVA 発電機の $Z_p - Z_R$ を求めたのが第2.22図、15,000 kVA は第2.23図、40 kVA は第2.24図に示してある。その結果、波頭の巻線を一往復する時間は第2.13表に示す通りである。



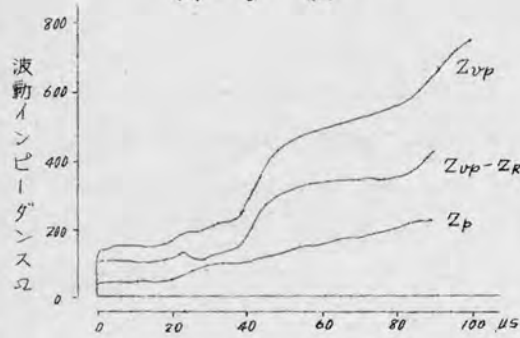
第2.22図 11,000 kVA



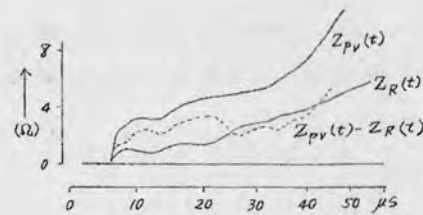
(a) U 相



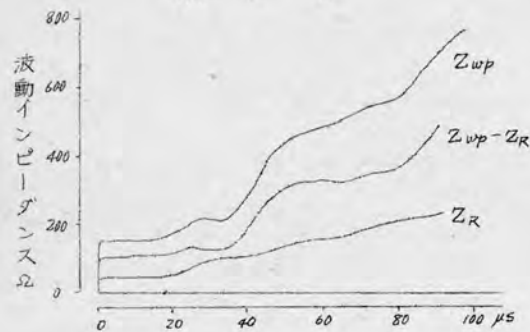
(a) U 相



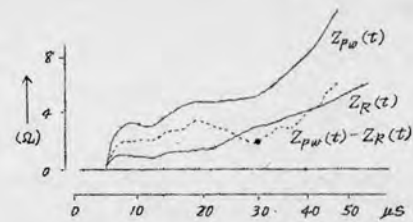
(b) V 相



(b) V 相



(c) W 相



(c) W 相

第 2.24 図 40 kVA

第 2.23 図 15,000 kVA

第 2.13 表

供試発電機 (kVA)	巻線を往復するに要する時間(μs)		
	U	V	W
400	10	10	10
1500	/		
11000			
15000	28	32	32
40	36	36	34
	21	21	22

(ii) Boehne 氏提案との比較検討

過渡波動インピーダンス波形より求めた波頭の巻線を一往復するに要

する時間と Boehne 氏の提案により求めた値、さらに過渡波動インピーダンス波形の固有振動数より求めたのを比較したのが第 2.14 表である。この表から知ることは Boehne 氏の提案ならば $\frac{\lambda}{4}$ の固有周期から求めた巻線を往復するに要する時間は過渡波動インピーダンスより求めたものより時間が長い。これは基本的に對する巻線の往復時間ではなく、高周波分をも含めた合成されたものに対する固有周期であるので、固有周期は次第に増して行く。したがつて、Boehne 氏提案および $\frac{1}{4}$ 波長の周期より求めた伝播速度は過渡波動インピーダンスより求めたものよりおそい速度となる。それ故に伝播速度は過渡波動インピーダンスより求めることを推奨する。

第 2.14 表

供試発電機 (kVA)	巻線を往復するに要する時間 (μs)		
	過渡波動インピーダンスより求めた値	Boehne 氏提案による	$\frac{\lambda}{4}$ の固有振動より求めた値
400	10	13	11.5
1,500	16	20.5	17.5
11,000	32	/	42.5
15,000	36 36		36.0
40	21	18.5	/

めた巻線を往復するに要する時間は過渡波動インピーダンスより求めたものより時間が長い。これは基本的に對する巻線の往復時間ではなく、高周波分をも含めた合成されたものに対する固有周期であるので、固有周期は次第に増して行く。したがつて、Boehne 氏提案および $\frac{1}{4}$ 波長の周期より求めた伝播速度は過渡波動インピーダンスより求めたものよりおそい速度となる。それ故に伝播速度は過渡波動インピーダンスより求めることを推奨する。

3.2.5. 結 言

回転子を取り除いた状態における発電機巻線の過渡波動インピーダンスを測定し、発電機巻線の直行波の伝播特性を論じて来た。これを要約すると次の通りである。

- i. 巻線の過渡波動インピーダンスより初期における波動インピーダンスを求め三相送電線の対称分インピーダンスの考え方を導入した結果、
 - (i) 三相、鎖形巻発電機の巻線においては一相巻線対大地間波動インピーダンスと一線対大地二線間波動インピーダンスとは等しく、三相一相大地間波動インピーダンスの3倍である。この三つの波動インピーダンスより対称分波動インピーダンスを求めると零相分と正相分が等しい。したがつて発電機巻線は多算線系回路と考えるより、単一回路として考察すべきである。
 - (ii) 二層、重巻発電機の巻線においては一相巻線対大地間と一巻線対大地二巻線間波動インピーダンスとは後者が極僅か低く、三相巻線一相大地間波動インピーダンスの3倍したものより大きい。これは異相間の相互インダクタンスが負の符号をもつて作用しているため、単層巻と同様単一回路として考察することはできぬ。
2. 発電機巻線の過渡波動インピーダンス波形は大きく二つの型に分類される。一つは単層巻巻線に見る平滑な波形で、他は凸部を生ずる波形である。凸部を生ずるのは巻線の始端に近い線輪と終端に近い線輪とが同一溝に納まっている場合に生じるもので、同相線輪間の相互インダクタンスが作用している。

ためである。巻線の線路配置、即ち巻線方式により巻線の過渡波動インピーダンス波形は変化する。

3. 巻線の過渡波動インピーダンス波形の波頭の形状には、固定子鉄心の表皮効果をも初めているが、しかし、巻線の始端線路の大体一巻回線のインダクタンスおよび対地静電容量が初いている。
4. 巻線を進行する進行波の波頭の減衰は大きく、また歪歪をもある。
5. 巻線の進行波の伝播速度は各相巻線の線路間の相互誘導が複雑に作用していることと、進行波の鉄心の表皮効果による歪歪、減衰のため反射波の波頭の始端への到達点が不明で、終端条件を変えて測定した過渡波動インピーダンス波形より直接求めることは困難である。
6. 伝播速度はAケースの過渡波動インピーダンス波形とBケースの過渡波動インピーダンス波形より作図して求めることを推奨した。

第3章 発電機巻線の衝撃波特性(その2)

(回転子が挿入されている状態における固定子巻線の衝撃波特性)

第3章 発電機巻線の衝撃波特性 (その2)

回転子が挿入されている状態における固定子巻線の衝撃波特性

§3.1 緒 言

本章において回転子磁極が固定子巻線の過渡インピーダンスに及ぼす影響について論ずることとする。

発電機巻線の衝撃波特性を述べた論文には回転子磁極および回転子巻線の効果、さらには制動巻線の効果については殆んど論ぜられていない。筆者は多数の発電機の過渡波動インピーダンスをオシログラフで実測したので、その結果を基にして論ずることとする。

第3.2節は回転子が挿入されている状態の各相巻線の過渡波動インピーダンスを第2.1表の試験ケースに基づいて測定した結果について述べ、回転子磁極の存在による線輪の漏洩インピーダンスの増加と、回転子磁極による表皮効果について述べる。

なお、回転子巻線を短絡開放して各相巻線の過渡波動インピーダンスを測定し、測定したオシログラムより回転子巻線の過渡波動インピーダンスに与える影響を調べた。

第3.3節は制動巻線の各相巻線の過渡波動インピーダンスに与える影響を実測したオシログラムにて説明し、制動巻線の過渡波動インピーダンスに与える効果について定量的に説明する。

第3.4節において、固定子巻線に単位電流を流したとき回転子巻線の両端子に誘起する電圧を測定した結果に基づいて説明し、回転子の磁極の表皮効果、および固定子巻線と回転子巻線との結合の度合について述べる。

§3.2 巻線の過渡波動インピーダンスに与える回転子の影響について

回転子がある状態における固定子各相巻線の試験ケースに対する過渡波動インピーダンスのオシログラムは附録に掲載しておいた。本節では回転子磁極の固定子巻線の過渡波動インピーダンスに与える効果について述べる。

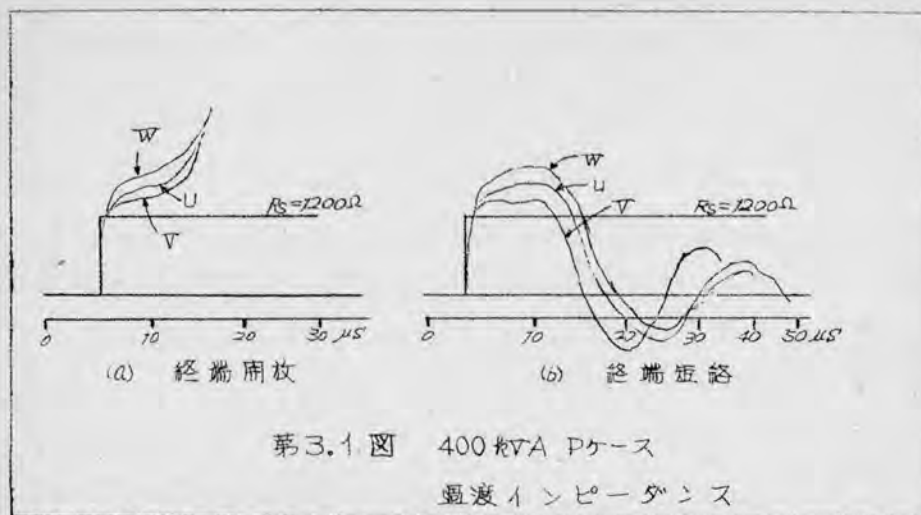
3.2.1 各相巻線の過渡波動インピーダンス波形

供試発電機8台の過渡波動インピーダンスオシログラムを説明する。

(1) 400kVA 発電機

回転子が挿入されている状態における固定子巻線の過渡波動インピーダンスのうち試験ケースPの各相巻線の過渡波動インピーダンスも終端条件に分けてそれぞれ一語に図示したので第3.1図である。

回転子がない状態における各相の過渡波動インピーダンスは大体同一であつたが、第3.1図のオシログラムから回転子磁極のため各相の波動インピーダンスが異なっているのを知る。なお波頭の立上りが円味をもつて来ている



固定子巻線と
磁極との相対
位置を示した
のが第3.2図
である。この
図よりW相巻
線およびU相
巻線は磁極と
対応している
ので過渡変動
インピーダン
スには回転子

磁極の影響があることが一応うなづける。

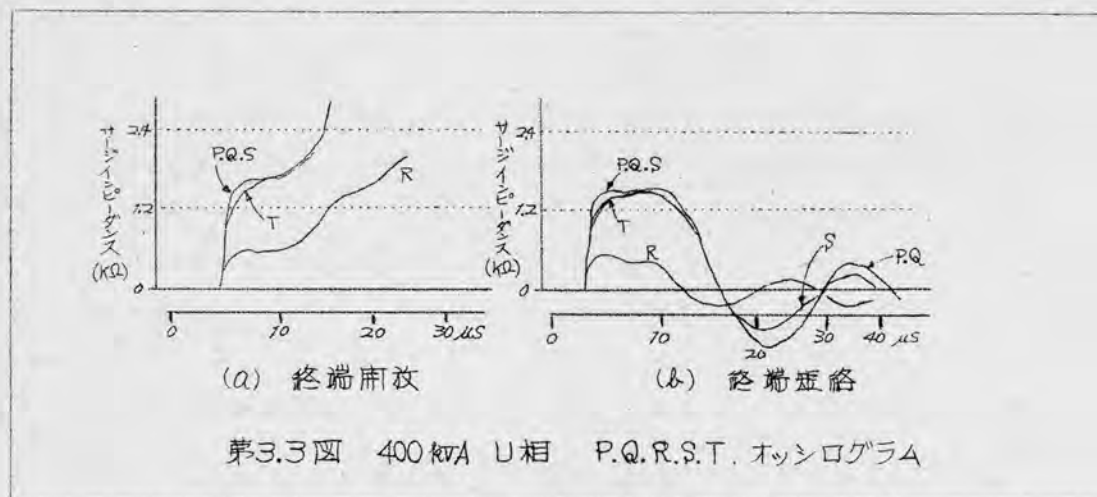
次に試験ケースP.Q.S

およびTに対するU
相のオッシログラム
を一語に重ねて図示
したのが第3.3図で、
過渡インピーダンス
波形はP.Q.Sとも同
一波形で、Tケース
は円味と帯びた波形
となっている。

尚Rケースのオッシ
ログラムも図示して
おいた。



回転子がない場合との主なる相違点は次の二点である。

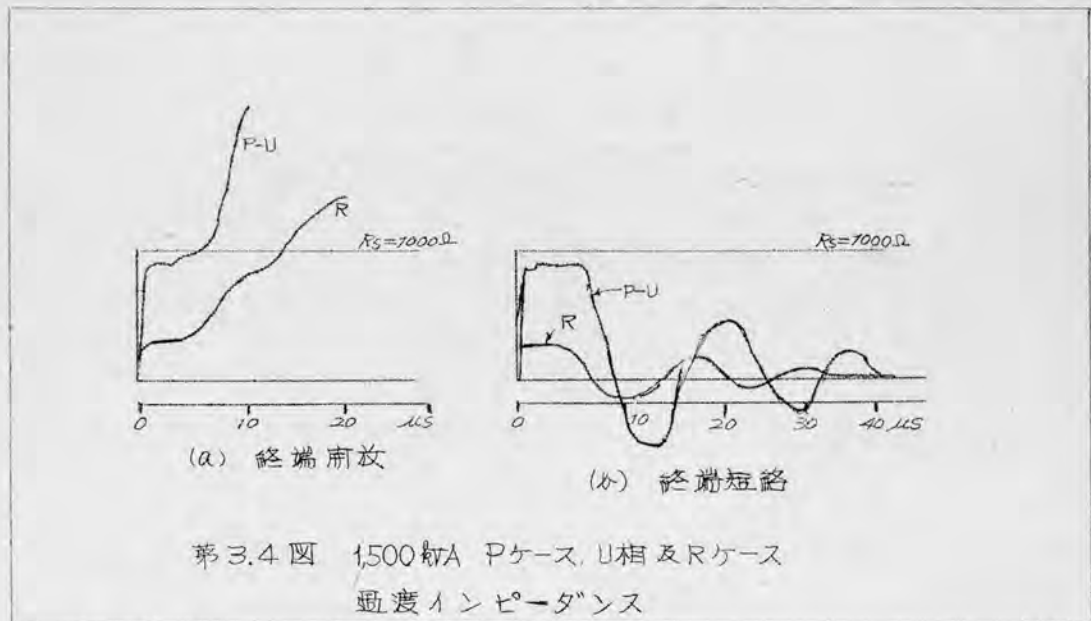


(i) 各波形の初期の突起部がなくなり、円味を帯びている。

(ii) 磁極の位置により、各相の過渡波動インピーダンスが異なった波形となった。

(2) 1,500 kVA 発電機

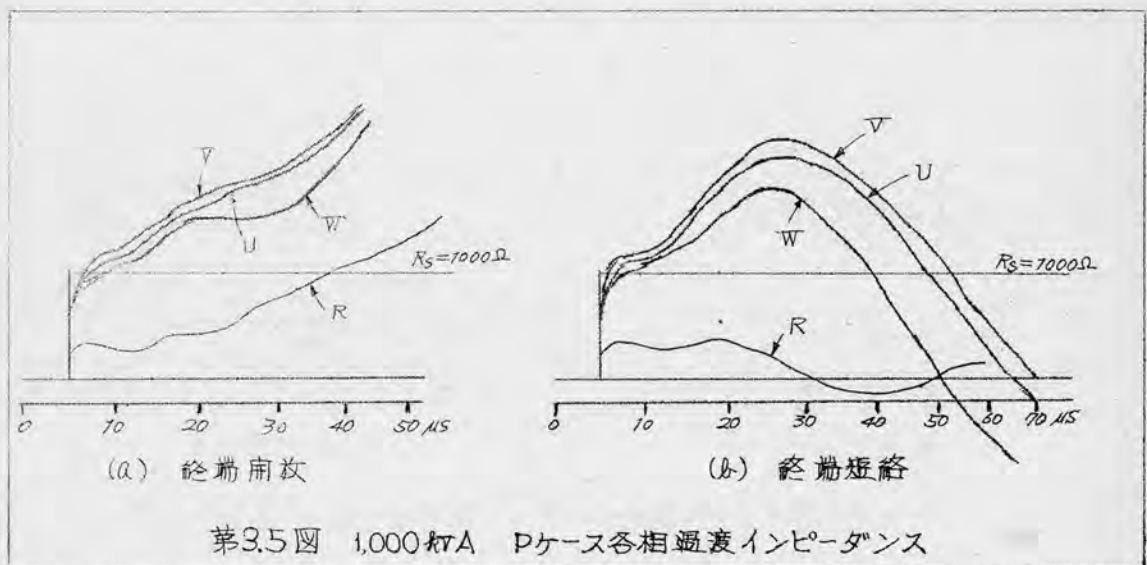
試験ケース P, Q, R および S について各相の過渡波動インピーダンスを測定した。その結果、各相とも同一試験ケースに対しては大体同一の過渡波動インピーダンス波形であり、かつ P, Q および S ケースにおける各相の過渡波動



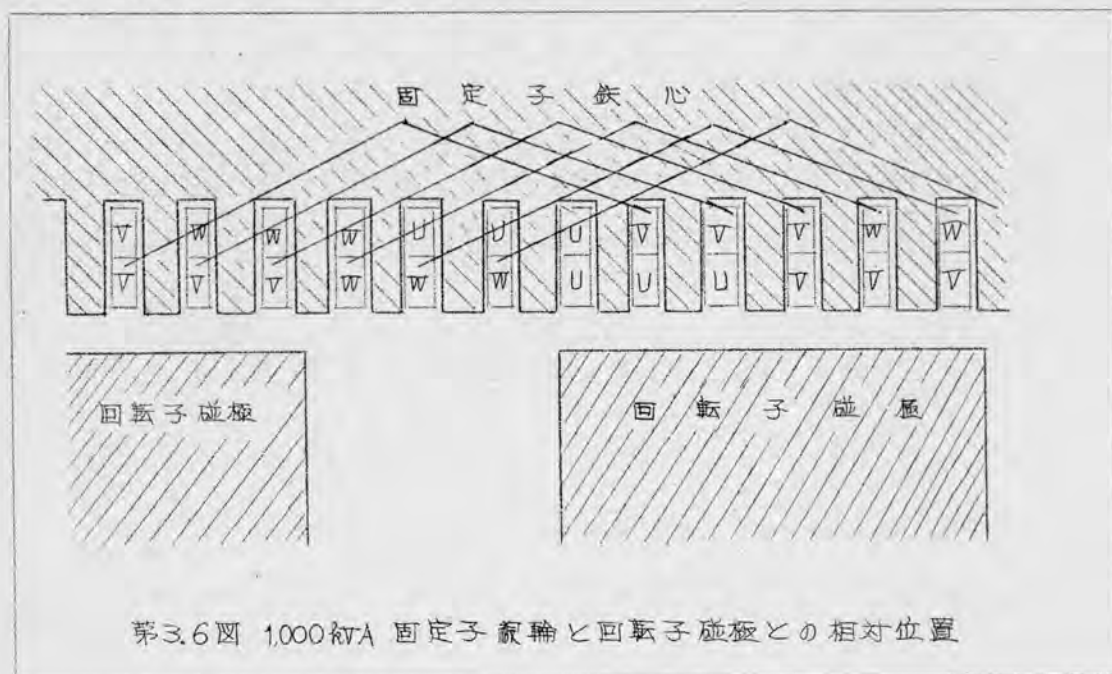
インピーダンス波形は同一である。第3.4図はその代表的オシログラムとして、PケースU相とRケースのオシログラムを示しておいた。固定子巻線は半閉導である。

(3) 1,000 kVA 発電機

固定子巻線の過渡波動インピーダンスを試験ケース P, Q, R, S, および T につ

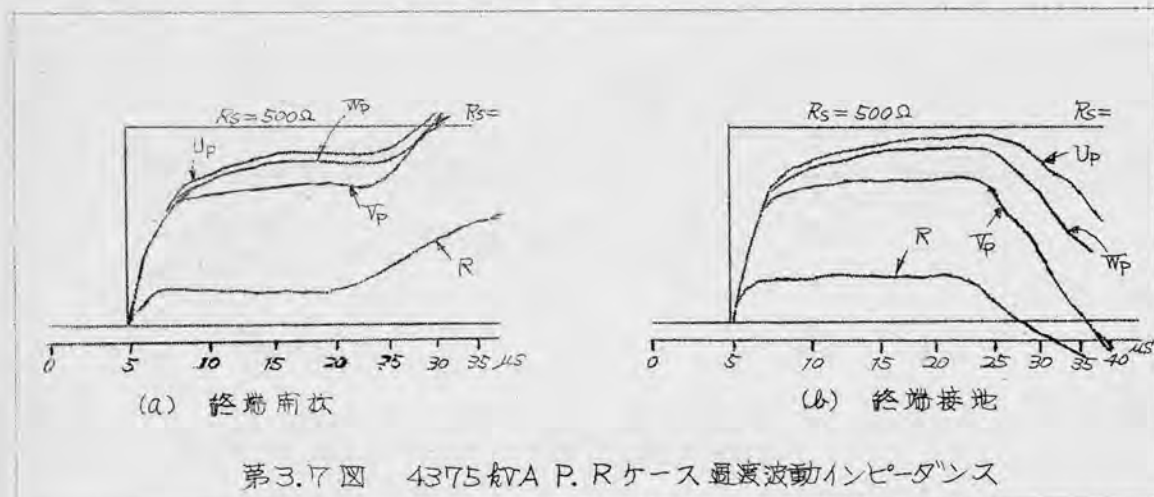


いて各相とも測定した。代表的なオッシログラムとして、Pケースの各相の過渡波動インピーダンスのオッシログラムと、Rケースのオッシログラムとを示したのが第3.5図である。このオッシログラムから各相巻線の過渡波動インピーダンスがそれぞれ異なっていることを知る。第2章第2.7図では初期においては各相が大体等しい過渡波動インピーダンスであった。今回转子磁極と固定子各相線輪との相対位置を略図で示すと第3.6図の通りで、溝内の上コイルと磁極との関係はU相とV相との線輪が磁極面に対応した溝にあり、W相の線輪は磁極間に位置している。

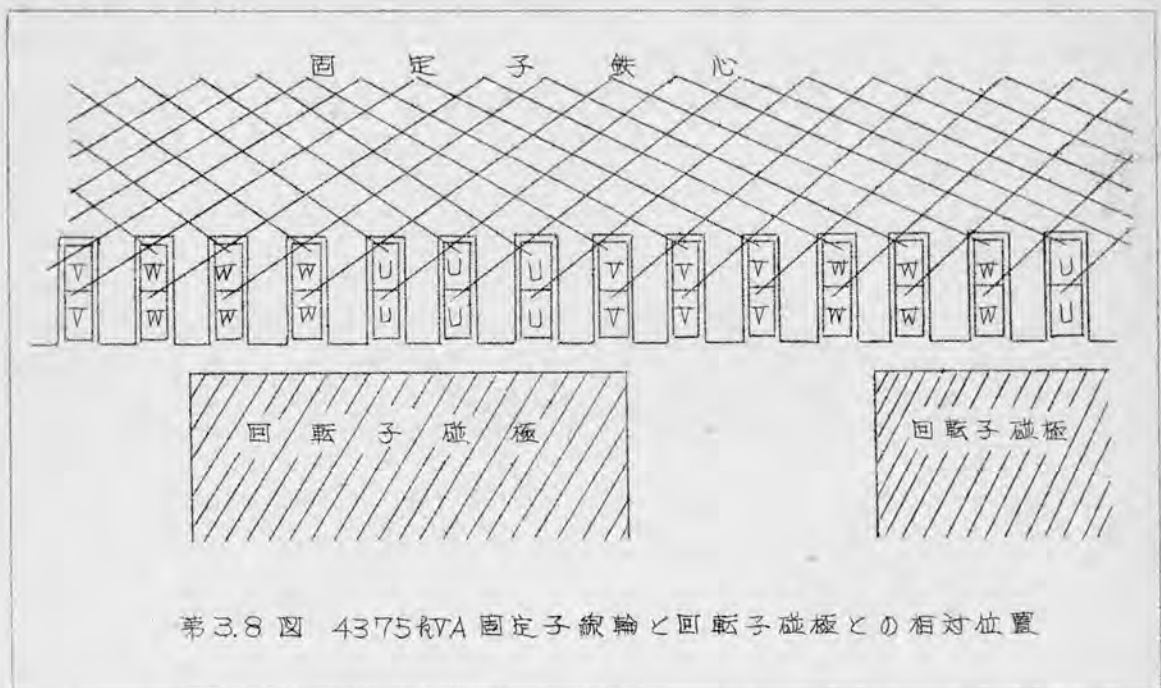


(4) 4375 kVA (6.6 kV) 発電機

固定子巻線の過渡波動インピーダンスは、試験ケースP.Q.R.SおよびTについて測定した。代表的なオッシログラムとしてPケースの各相過渡インピーダンスとRケースの過渡波動インピーダンスのオッシログラムを示したの

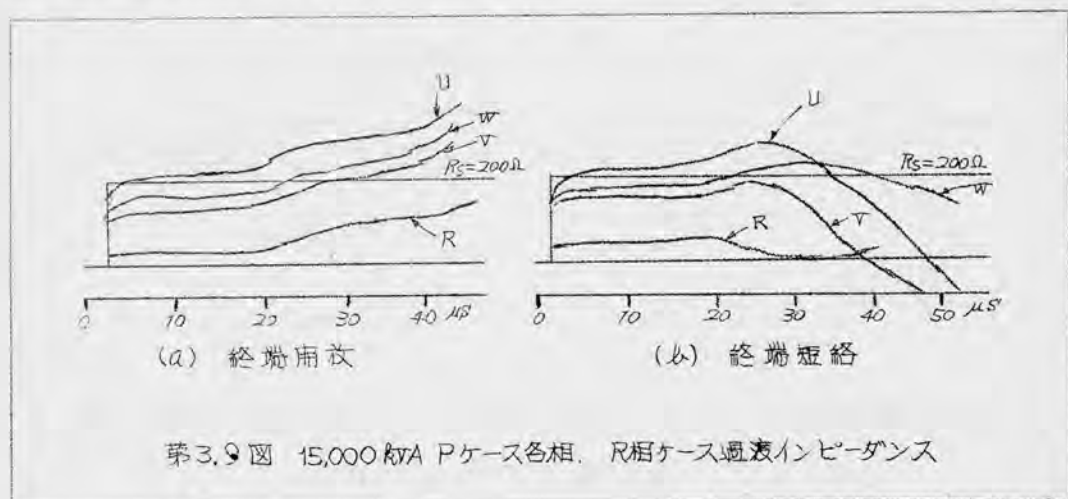


が第3.7図である。このオッシログラムより回転子磁極による各相の過渡波動インピーダンスがそれぞれ異なった波形となっているのが分る。各相巻線の銀輪と回転子磁極との相対位置を図示したのが第3.8図である。毎極毎相の溝数は3で、第3.8図に示した如く同一溝に同一相の銀輪が3つあり、U相は毎極3溝とも磁極に面しているが、他の二相の内W相に2溝、V相は1溝となっている。



(5) 15,000 kVA 発電機

固定子巻線の過渡波動インピーダンスは試験ケースP、QおよびRケースについて実測した。その一例としてPケースにおける各相過渡波動インピーダンスとRケースの過渡波動インピーダンスのオッシログラムを示したのが第3.9図である。回転子がない場合の各相過渡インピーダンス波形は大体同一

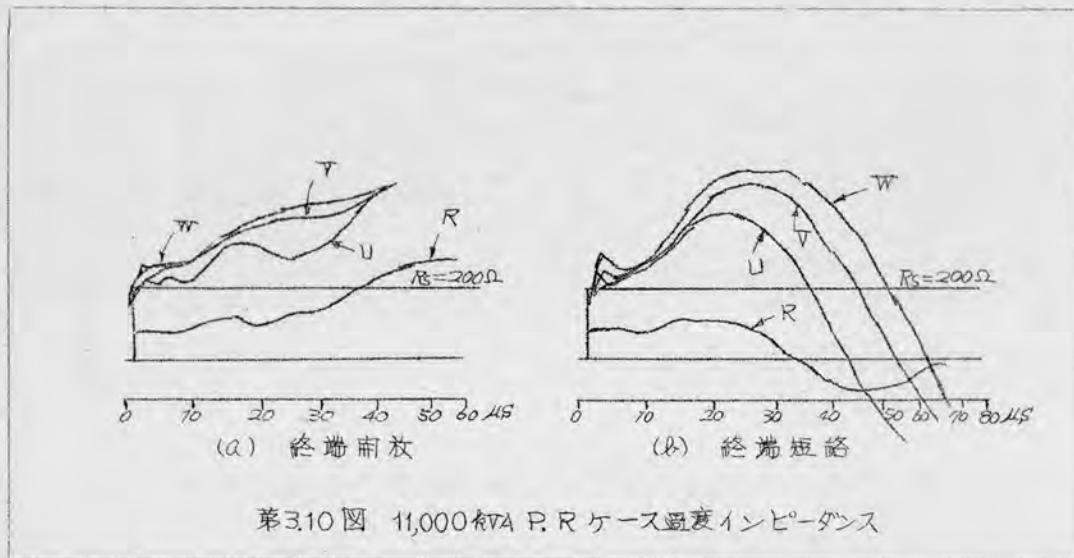


であつたが、回転子がある場合はその磁極の位置の違いにより各相過渡インピーダンスが異なっている。

当該発電機の各相線輪と回転子磁極との相対的位置を記録していないので不明である。

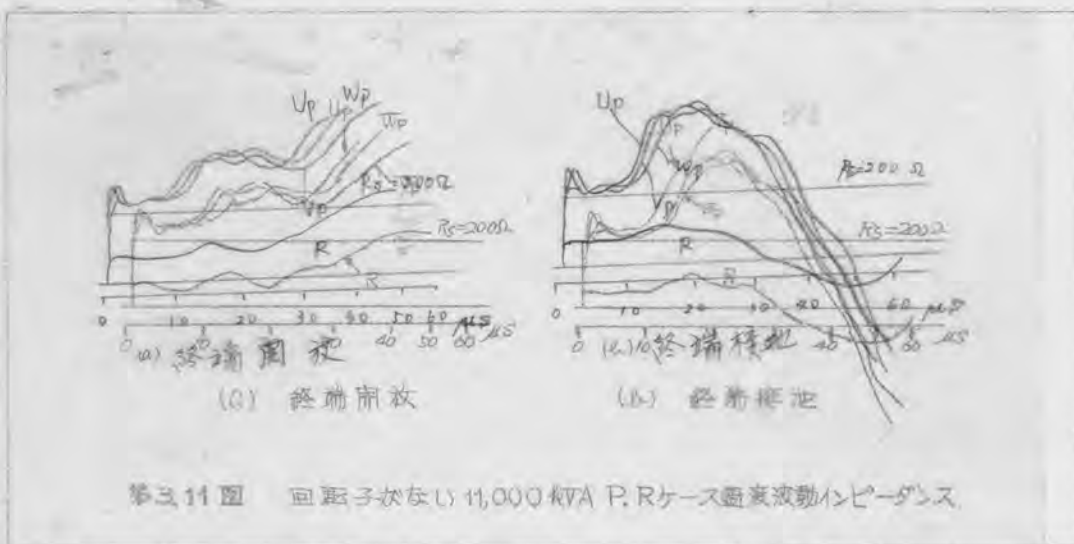
(6) 11,000 kVA 発電機

試験ケース P, Q および R について各相過渡波動インピーダンスを測定した。P ケースにおける各相の過渡波動インピーダンスと R ケースとを終端条件によりそれぞれ分けて図示したのが第 3.10 図である。回転子がない状態におけ



第 3.10 図 11,000 kVA P, R ケース過渡インピーダンス

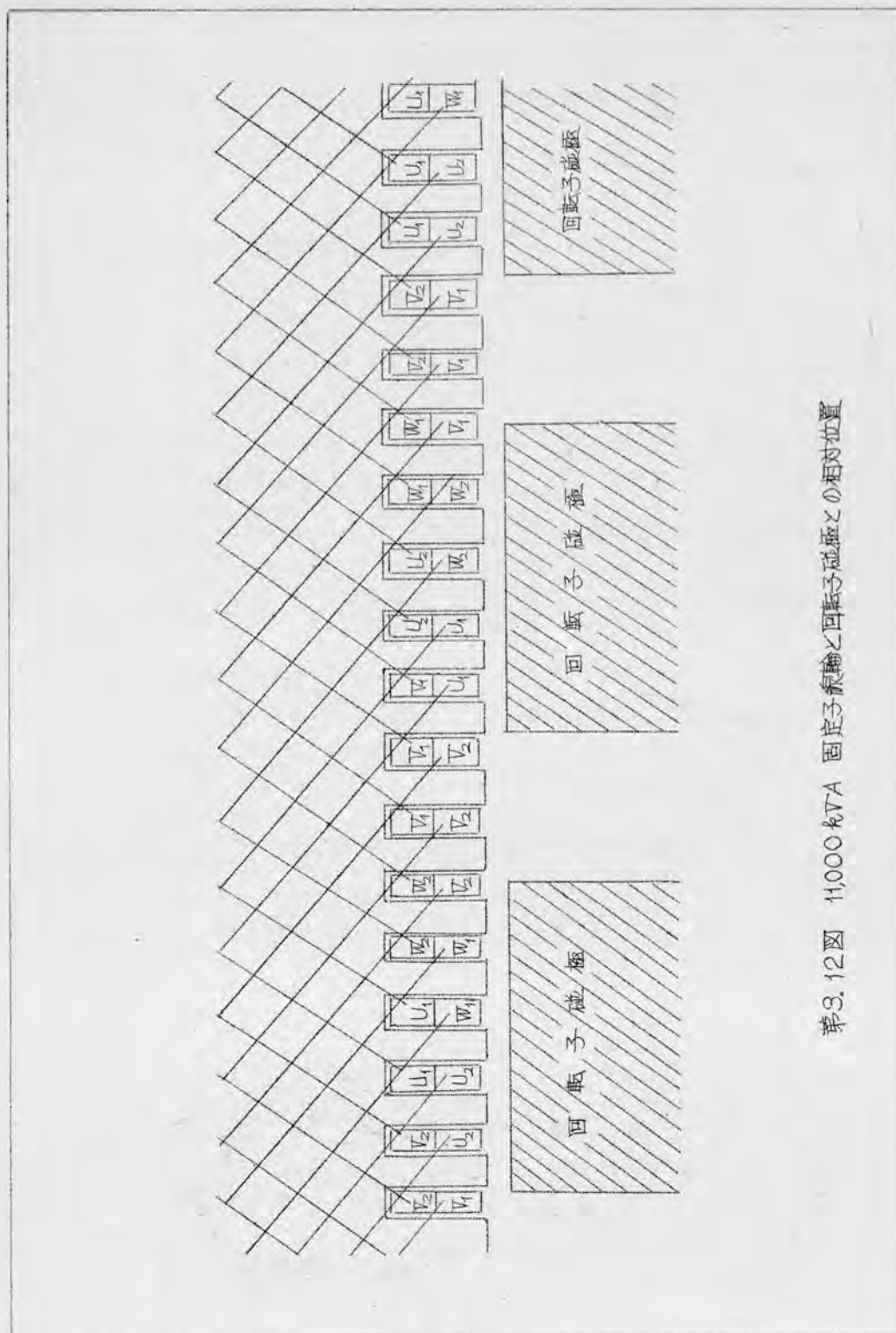
る過渡波動インピーダンスを比較するため第 3.11 図に P ケースの各相過渡波動インピーダンスを示した。この両図を比較すると P ケースの波動インピー



第 3.11 図 回転子がない 11,000 kVA P, R ケース過渡波動インピーダンス

ダンスは回転子磁極の存在により大きくなり、過渡波動インピーダンス波形も変化している。

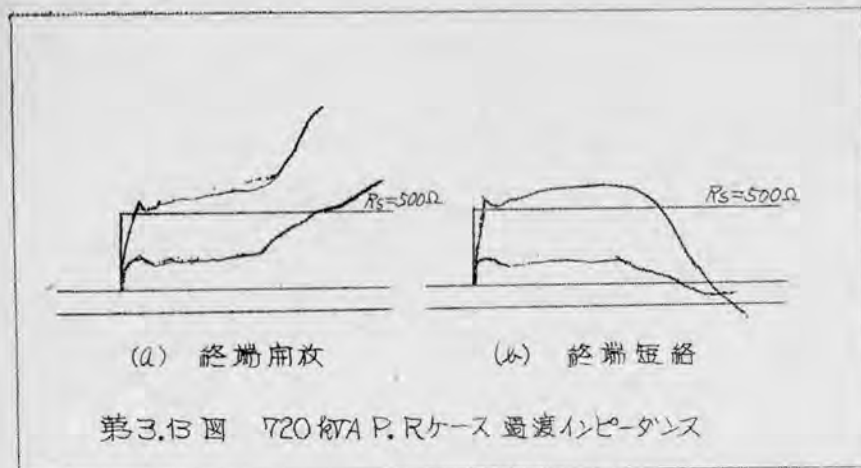
回転子磁極と各相線輪との相対位置を示したのが第 3.12 図である。



第3.12図 11,000 kVA 固定子速輪と回転子励磁との相対位置

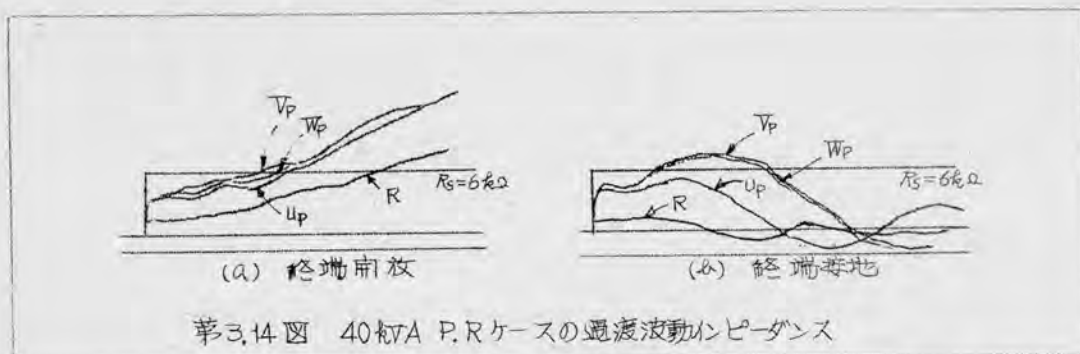
(7) 720 kVA (单相鎖形巻) 発電機

固定子巻線の過渡波動インピーダンスは試験ケースP.QおよびRについて測定した。波頭の波動インピーダンスは各相とも等しく540Ωで、試験ケースP.Qとも相等しい。Rケースの波動インピーダンスは180ΩでP.Qケースの1/30である。P.Qケースの波動インピーダンスは時間の経過と共に増している。

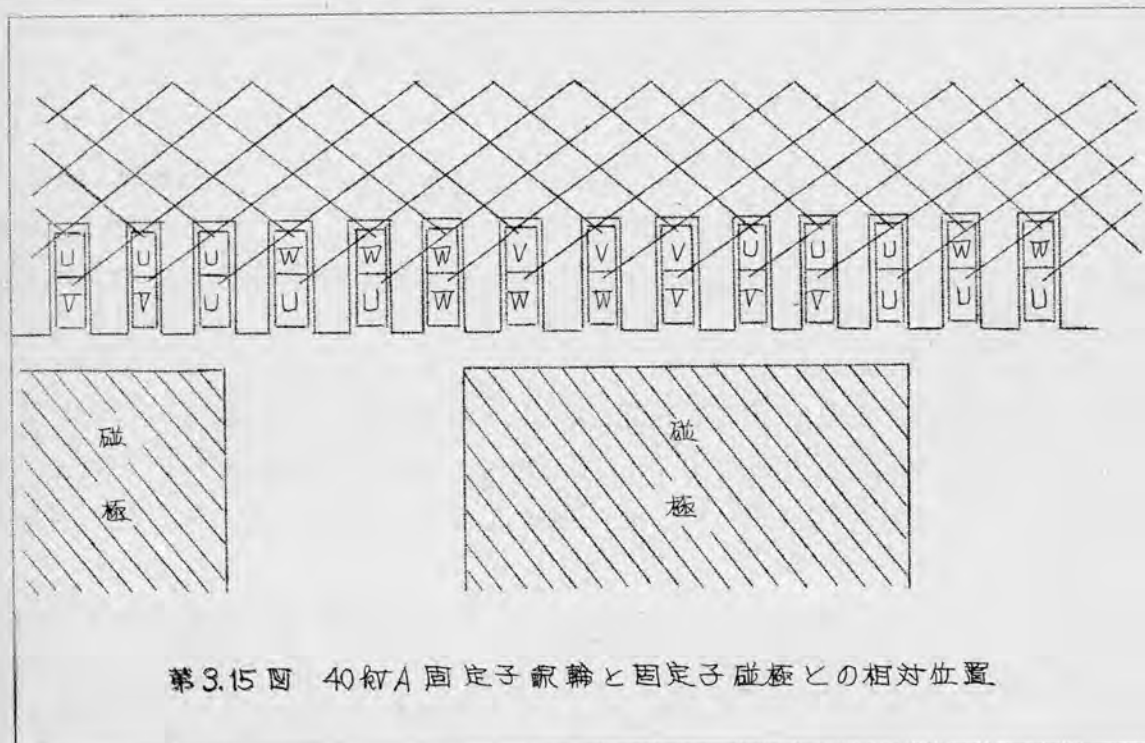


当發電機の固定子巻は半閉巻で第3.4図の1,500VA發電機と類似している。

(8) 40 kVA 巻線の過渡波動インピーダンスは試験ケース P, Q, R, S および T について測定した。P ケース, R ケースの各相過渡波動インピーダンスを示したのが表 3.14 図である。



固定子と巻線と回転子の関係を示したのが第3.15図である。V相の每極



3つの薄とW相の毎極2つの薄とU相の1つの薄の一部が回転子磁極と相対している。この固定子磁極と磁極の相対位置の關係を第3.14図の各相巻線の過渡波動インピーダンス波形とから磁極の鉄心によるものなることが考えられる。

以上回転子が挿入された発電機8台の固定子巻線の過渡波動インピーダンスオシログラムについて説明したが、回転子の存在による影響を纏めると次の通りである。

- (i) 過渡波動インピーダンス波形の波頭部が割合に円味を帯びている。
- (ii) 波動インピーダンスが増大し、時間と共に新增している。回転子磁極の位置により波動インピーダンスの増加ならびに波形が異なってくる。
- (iii) 波頭の減衰、および変至は回転子がない場合より大きい。
- (iv) 反射点が不明確となっている。

回転子がある場合とない場合の波動インピーダンスおよび減衰率を比較すると第3.1表の通りである。

第3.1表

伏試発電機 (kVA)	波動インピーダンス(Ω)		減 衰 率	
	回転子有	回転子無	回転子有	回転子無
400	1,650(W)	1,650(W)	0.65(W)	0.37(W)
1,500	880(V)	880(V)	0.30(V)	0.27(V)
1,000	1,200(V)	1,200(V)	/	/
4,375	470(U)	325(U)	0.82(U)	0.55(U)
11,000	250(W)	230(W)	0.55(W)	0.29(W)
15,000	270(U)	170(U)	0.36(U)	0.71(U)
40	3,600(V)	3,200(V)	0.79(V)	/

註: () は相を表はす

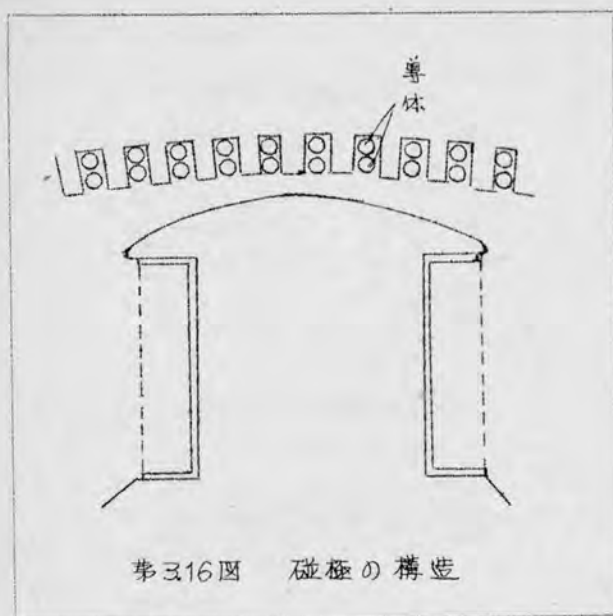
回転子磁極の存在により波動インピーダンスは大体10~20%程度の増加であるが、減衰の方は著しく影響している。1,500kVA および 720kVAの発電機の回転子巻線は半閉巻であるため、固定子薄を通る鎖交磁束は回転子磁極の存在により余り変化しない。

3.2.2. 回転子巻線の過渡波動インピーダンスに与える影響

回転子巻線の端子を短絡開放して、固定子巻線の過渡波動インピーダンスを測定し、その影響を調べた。伏試発電機は4,375kVA (6.6kV)、1,000kVA (11kV)である。

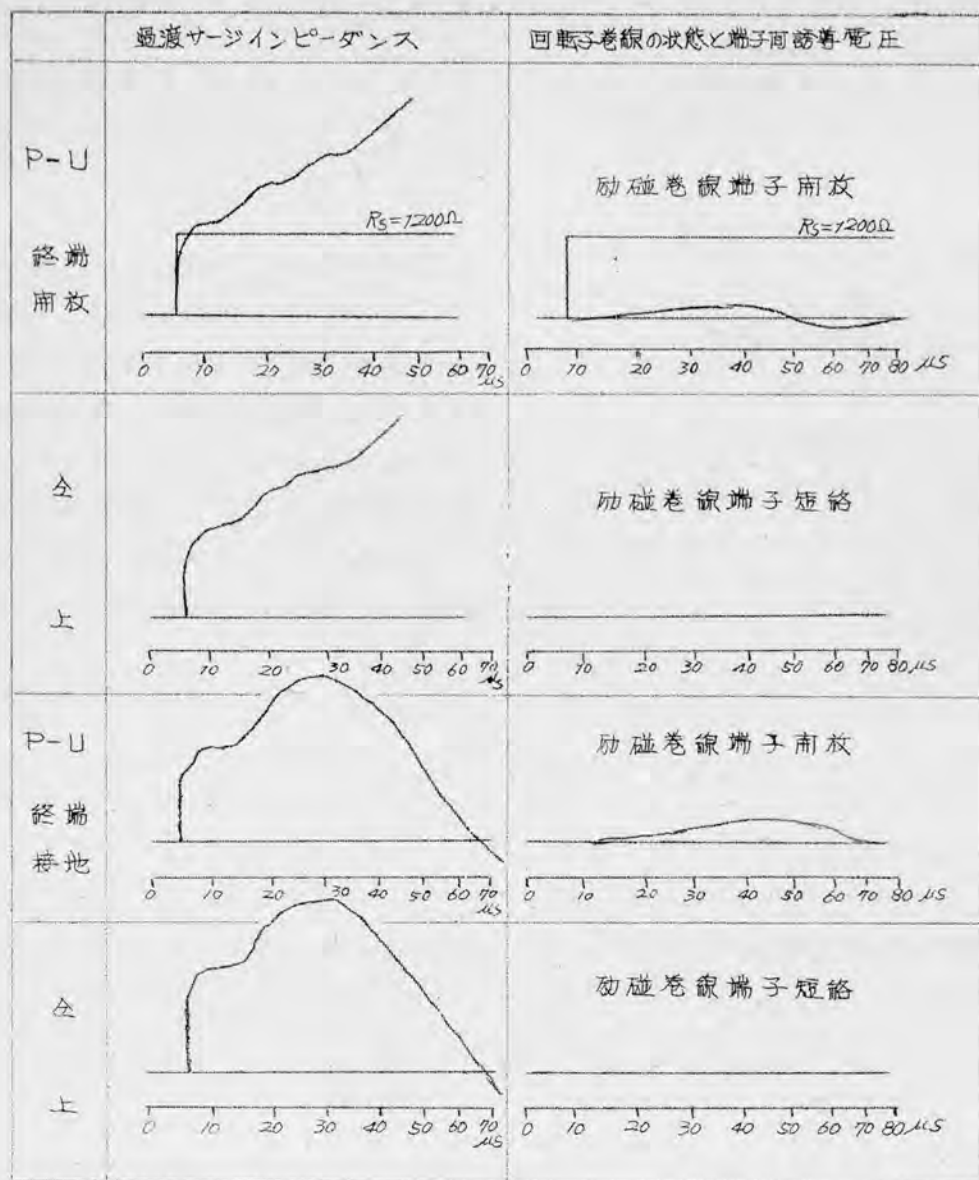
1,000kVA発電機においてはPケースについて測定した結果、過渡波動インピーダンスは回転子巻線の端子を短絡、開放しても変わらない。又4,375kVAでも同様である。したがってこの二台の測定結果から回転子巻線は回

定子巻線の過渡波動インピーダンスに影響を与えることが分つた。以下その理由について考察する。



水車発電機の回転子磁極と固定子間の構造は大体において第3.16図に図示した通りである。固定子巻線と回転子巻線とは静電的には結合されていないことは構造上から理解される。又固定子線輪に電流を流した時に生ずる磁束の一部は固定子から回転子の磁極に入り、回転子鉄心内を通り、回転子巻線と鎖交するので誘起電圧が発生する。実測結果の一例として11kV、1,000kVA 発電機の巻線の端子を短絡、開放したときのU相の過渡

波動インピーダンスと、開放時の巻線端子の電圧を求めたのが第3.17図である。このオシログラムから知れることは、回転子巻線の端子の誘導電圧は緩やかな曲線であることと、PケースにおけるU相と回転子巻線との電磁結合係数を第3.17図より求めると0.065 (6.5%) となり極めて結合は小さい。したがって過渡波動インピーダンスには巻線の影響はあらわれない。



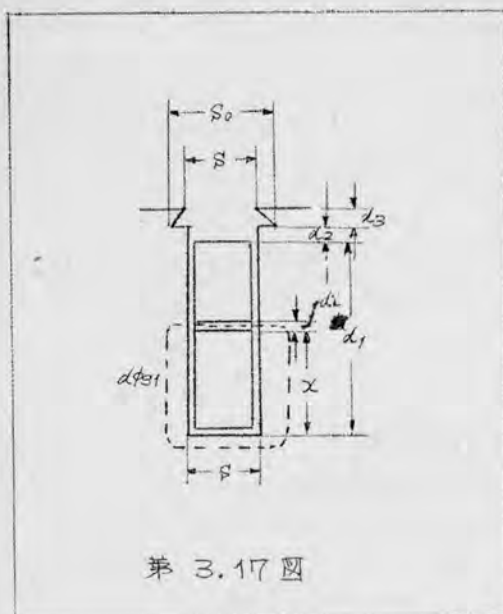
第3.17図

3.2.3. 回転子磁極による溝漏洩磁束の増加について

回転子磁極の存在が固定子巻線の過渡波動インピーダンスに影響していることは本章の第3.2.1項において説明したので、理論的に考察してみる。

隙間に電流が流れると磁束ができるが、その磁束の内、溝内で線輪導線と横交する磁束（溝漏洩磁束と称す）溝の両側の歯端を通り、線輪導線と横交する磁束（歯端漏洩磁束と称し、磁極と固定子歯との関係位置および空隙の長さによつて変わる）および線輪端部における鎖交磁束（線輪端漏洩磁束と称す）がある。これら磁束による自己インダクタンスを求める数式の誘導に当たつて次のことを仮定する。

- (i) 鉄心の磁気抵抗は空気の部分に比して極めて小さいのでこれを無視す



第 3.17 図

(ii) 鉄心は鉄心との間に絶縁物を有している。これを無視する。

(iii) 薄には一ヶの鉄心導体があるとするが、これを無視する。

(1) 薄漏れ磁束による自己インダクタンス L_{s1} 薄部の状態を第 3.17 図に示す。薄漏れ磁束は薄内導体の中を通る磁束 ϕ_{s1} と薄内導体の上部を通る磁束 ϕ_{s2} とからなる。

第 3.17 図において単位電流を流した時の導体 dx を通る磁束 $d\phi_{s1}$ は次式で表わされる。

$$\begin{aligned} d\phi_{s1} &= 0.4\pi n \frac{l}{d_1} \times \frac{l_c dx}{s} \\ &= 0.4\pi \frac{n \cdot l_c}{d_1 \cdot s} \cdot x dx \end{aligned} \quad (3.1)$$

ただし n : 鉄心導体数

l_c : 鉄心の有効長

薄内の導体と鎖交する全磁束 Φ_{s1} は (3.2) 式となる。

$$\Phi_{s1} = \int_{x=0}^{x=d_1} d\phi_{s1} \cdot n \frac{l}{d_1} \quad (3.2)$$

(3.1), (3.2) 式より

$$\begin{aligned} \Phi_{s1} &= 0.4\pi \frac{l_c \cdot n^2}{d_1^2 \cdot s} \int_0^{d_1} x^2 dx \\ &= 0.4\pi l_c \cdot n^2 \cdot \frac{d_1}{3s} \end{aligned} \quad (3.3)$$

したがって薄内鉄心の自己インダクタンス L_{s1} は (3.4) 式であらわされる。

$$L_{s1} = 0.4\pi l_c \cdot n^2 \frac{d_1}{3s} \cdot 10^{-8} \text{ (Henry)} \quad (3.4)$$

次に薄内導体より上部を通る磁束 ϕ_{s2} は (3.5) 式であらわされる。

$$\phi_{s2} = 0.4\pi n \times l_c \left(\frac{d_2}{s} + \frac{2d_3}{s+s_0} \right) \quad (3.5)$$

この磁束が薄内の n 本の導体と鎖交するので、その鎖交数 Φ_{s2} は

$$\Phi_{s2} = 0.4 \pi n^2 l_c \left(\frac{d_2}{S} + \frac{2d_3}{S+S_0} \right) \dots\dots\dots (3.6)$$

となるので、 Φ_{s2} による自己インダクタンスは(3.7)式となる。

$$L_{s2} = 0.4 \pi n^2 l_c \left(\frac{d_2}{S} + \frac{2d_3}{S+S_0} \right) \times 10^{-8} \text{ (Henry)} \dots\dots\dots (3.7)$$

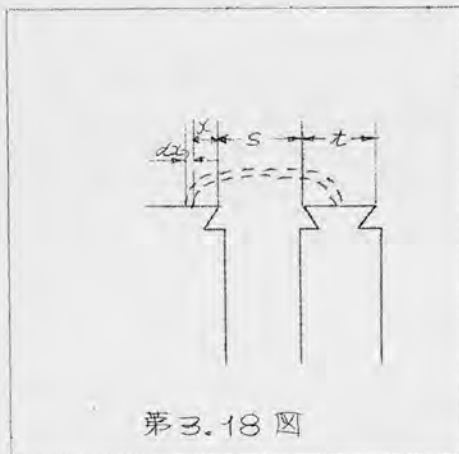
それ故に薄漏洩磁束による自己インダクタンス L_s は(3.4)、(3.7)式を加えたものとなる。すなわち

$$\begin{aligned} L_s &= L_{s1} + L_{s2} \\ &= 0.4 \pi l_c \cdot n^2 \left(\frac{d_1}{3S} + \frac{d_2}{S} + \frac{2d_3}{S+S_0} \right) \dots\dots\dots (3.8) \end{aligned}$$

(3.8)式より薄内の銀輪導線の自己インダクタンスは薄の巾が狭い程、薄の深さが深い程大きくなる。また溝口の形によっても変る。

(2) 歯端漏洩磁束による自己インダクタンス L_{x0} 。

回転子の磁極が薄の前面にない場合における歯端漏洩磁束による自己インダクタンスを求める。歯端部の構造を第3.18図に示す。薄の銀輪導線に単位電流を流した時、両極間の起磁力は



0.4 πn である。パーミアンスは磁路の巾 dx に対し、第3.18図から

$$\frac{l_c dx}{S + \pi x}$$

となる。それ故に歯端における漏洩磁束 $d\Phi_{x0}$ は

$$d\Phi_{x0} = 0.4 \pi n \times \frac{l_c dx}{S + \pi x} \dots\dots\dots (3.9)$$

全漏洩磁束 Φ_{x0} は歯端の巾全部に対して

求めればよい。したがって

$$\begin{aligned} \Phi_{x0} &= 0.4 \pi l_c \cdot n \int_{x=0}^{x=t} \frac{dx}{S + \pi x} = 0.4 \pi n l_c \cdot \frac{2.3}{\pi} \log \left(1 + \frac{\pi t}{S} \right) \\ &= 0.92 n l_c \log \left(1 + \frac{\pi t}{S} \right) \dots\dots\dots (3.10) \end{aligned}$$

薄内の n ヶの導線と鎖交する磁束数 Φ_{x0} は

$$\Phi_{x0} = 0.92 l_c n^2 \log \left(1 + \frac{\pi t}{S} \right)$$

したがって、 Φ_{x0} による自己インダクタンス L_{x0} は(3.11)式となる。すなわち

$$L_{x0} = 0.92 l_c n^2 \log \left(1 + \frac{\pi t}{S} \right) \times 10^{-8} \text{ (Henry)} \dots\dots\dots (3.11)$$

(3) 電極が磁極と対面している場合の歯端漏洩磁束による自己インダクタンス L_x

歯端における磁極間の空隙は一概でないが、これを一定とし、空隙を δ とする。また磁極鉄心のため、歯端における磁路は歯端の巾より広くなる。空隙係数 K とする歯端漏洩磁束 ϕ_x は次式であらわされる。

$$\phi_x = 0.4 \pi n l_c \cdot \frac{Kx}{2\delta} \quad (3.12)$$

この ϕ_x は溝内の線輪導体と鎖交するので、歯端漏洩磁束による自己インダクタンス L_x は (3.13) 式であらわされる。すなわち

$$L_x = 0.4 \pi n^2 l_c \cdot \frac{Kx}{2\delta} \times 10^{-8} \text{ (henry)} \quad (3.13)$$

(4) 線輪端部漏洩磁束による自己インダクタンス L_e

線輪端部における漏洩磁束は端部の形状によつて多少異なる。しかし、実際の形状について求めるのは困難であるので、端部を一つの円の円周として求めている。ここでは詳しく求める必要がないので簡単にする。

線輪端部の長さを l_e とし、この部分の漏洩磁束は全部導線を貫通するものとみなす。さらに線輪端部の単位長当りの漏洩磁路の抵抗を R_e とする。しあるときの漏洩磁束 ϕ_e は次式であらわされる。

$$\phi_e = \frac{0.4 \pi n l_e}{R_e} \quad (3.14)$$

この磁束が線輪導線 n 本と鎖交するので、線輪端部漏洩磁束による自己インダクタンス L_e は (3.15) 式であらわされる。すなわち

$$L_e = 0.4 \pi n^2 \frac{l_e}{R_e} \times 10^{-8} \text{ (henry)} \quad (3.15)$$

以上の考察より回輪子磁極がない時の線輪の自己インダクタンス L_0 、回転子磁極と対面している溝に嵌っている線輪の自己インダクタンス L は (3.16) 式であらわされる。筆者が試験に用いた巻電機は亀甲形線輪と鎖形線輪であるので、各自己インダクタンスは2倍したものが線輪の自己インダクタンスとなる。

$$\begin{aligned} L_0 &= 2(L_s + L_{x0} + L_e) \\ L &= 2(L_s + L_x + L_e) \end{aligned} \quad (3.16)$$

(3.16)式の両者の比較は、(3.11)式と(3.13)式の比較になる。すなわち

$$L - L_0 = 2 \cdot 0.4 \pi n^2 \cdot l_c \left\{ \frac{Kx}{2\delta} - \frac{2.3}{\pi} \log \left(1 + \frac{\pi x}{\delta} \right) \right\} \quad (3.17)$$

となり、 $\{ \}$ の中が正ならば回転子がある方が線輪の自己インダクタンスが増し、したがって巻線の波動インピーダンスは増して来る。実際は $\{ \}$ の中が正であるので回転子磁極に対して位置している発電機巻線の波動インピーダンスは回転子がない場合より大きくなる。

薄の半閉薄または閉鎖薄では(3.17)式、あるいは(3.11)式の巻線の巾は増し、薄の口巾は小さくなるので、 L_{to} は増す。一方(3.13)式の空隙が大きくなると L_e は減少するので、 $L_{to} = L_e$ に近づくことも考えられる。一例として1500 A/Aの発電機について(3.17)式の $\{ \}$ の中を求めてみる。
 [例題] $r = 3.8 \text{ cm}$, $\delta = 0.3 \text{ cm}$, $\delta' = 1.6 \text{ cm}$, $K = 1$ (空隙係数が不明なので、竹内著“電気機器設計学”より求める)のとき(3.17)式の $\{ \}$ の中を求める。すなわち

$$\left\{ \frac{Kx}{2\delta} - \frac{3.3}{\pi} \log \left(1 + \frac{\pi t}{\delta} \right) \right\} \div 0$$

となり、回転子の磁極により巻線の波動インピーダンスは変らぬことになり、実測結果と一致する。

以上の考察により回転子磁極の存在により波動インピーダンスが増加する理由と固定子薄が半閉鎖薄の場合、回転子磁極の存在の効果があらわれるか否かは(3.17)式により検討することができる。

3.2.4 回転子磁極の鉄心中の表皮効果について

巻線の始端における過渡波動インピーダンスは(2.48)式であらわされることを第2章第2.4節で述べた。さらに q/c は無視されることについても述べておいた。したがって過渡波動インピーダンス $Z(t)$ は次式であらわされる。すなわち

$$Z(t) = \sqrt{\frac{L}{C}} \left\{ 1 + \frac{1}{2} \frac{R}{L} t \right\} \dots\dots\dots (3.18)$$

第3.1図、第3.5図、第3.7図、第3.9図、第3.10図および第3.14図の過渡波動インピーダンスオシログラムから、各波形とも波頭部が割合に円味を帯び、時間と共に波動インピーダンスが漸増しているのが観察される。それ故に(3.18)式が成立する。すなわち回転子磁極の鉄心中の表皮効果に伴う渦流による損失とヒステリシス損失が加わるため、巻線の実効抵抗が増して来るものと考えられる。

回転子がない時の巻線の過渡波動インピーダンス波形には第2.4節で述べた如く、(3.18)式が成立しない。すなわち第1回の反射波が始端に到達する間においては同一薄に納まっている同相巻線の線輪間の相互誘導作用が固定子鉄心中の表皮効果より強く作用し、鉄心中の表皮効果はマスクされた状

悉である。したがって回転子磁極の存在による漏れインダクタンスのみが増加すると考える時は、巻線の過渡波動インピーダンス波形は回転子がない時のものより波動インピーダンスが増し、伝播速度が多少遅くなり波形は大体似たものとする。それ故に回転子の存在により固定子巻線の実効抵抗、および実効インダクタンスが増大すると思われる。

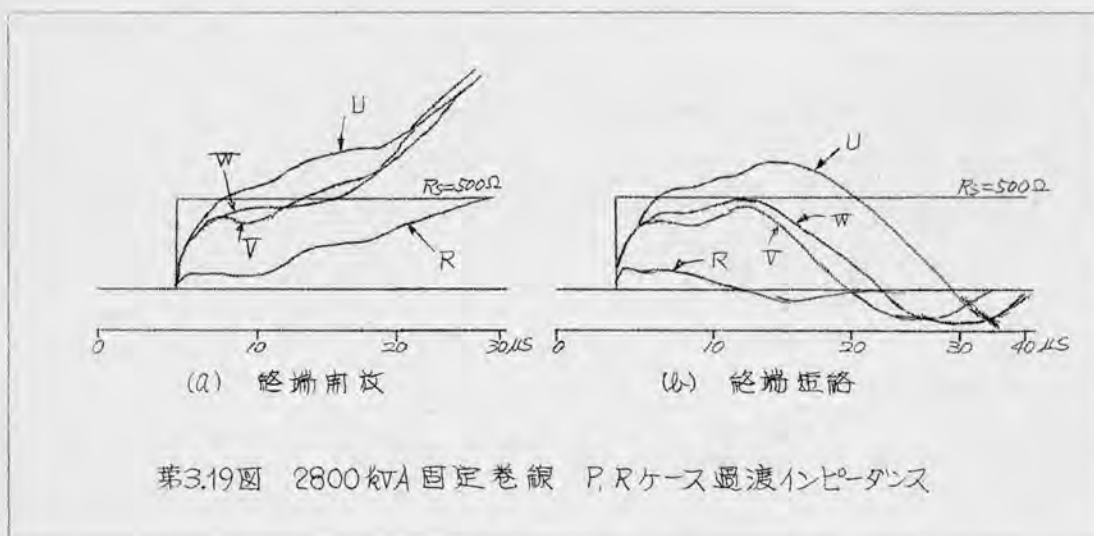
§ 3.3 制動巻線と有する発電機の固定子巻線の過渡波動インピーダンス。

本節においては制動巻線と有する発電機巻線の過渡波動インピーダンスについて述べる。実測した台数は5台で、実際制動巻線と有する発電機なる台模倣制動巻線（附録第2.2図、第2.32図参照）と対した発電機が2台である。

3.3.1 制動巻線と有する場合の固定子巻線の過渡波動インピーダンス波形。

(1) 2,800 kVA (3,450 V) 発電機

固定子巻線の過渡インピーダンスは試験ケースP、Q、R、SおよびTについて実測した。その内P、Rケースのオシログラムを示したのが第3.19図である。



両側の都合で過渡インピーダンス測定時の磁極と固定子銀輪との関係を知ることができなかった。第3.2節において述べた回転子が存在する場合と同様磁極による表裏効果が考えられる。

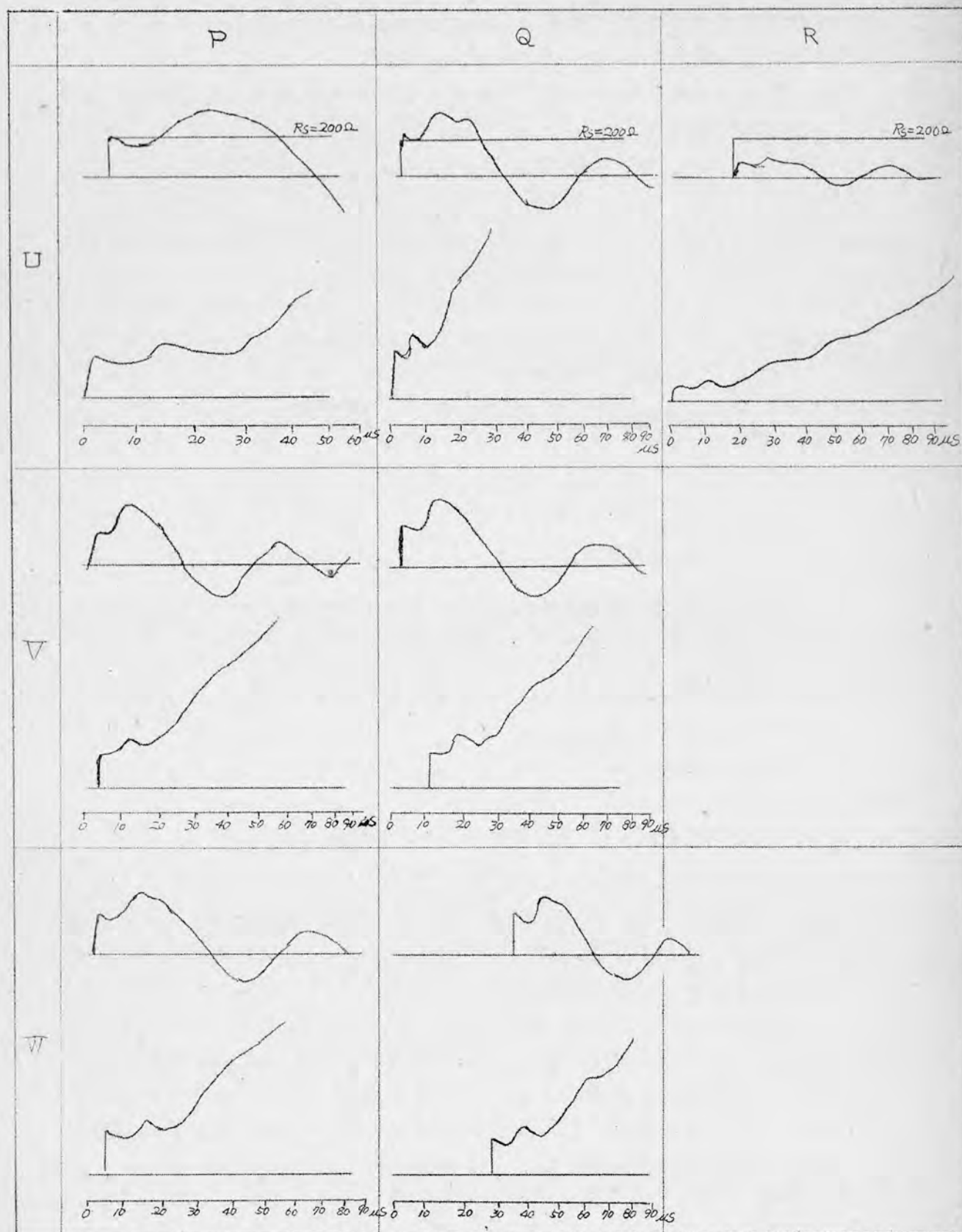
(2) 11,000 kVA (11,000 V) 発電機

第2章に述べた11,000 kVA 発電機、さらに本章の第3.2.1項で述べた、11,000 kVA とは別個の発電機であるが、第2章および本章の第3.2.1項で述べた発電機とは同一製作所の製作のもので、本項で述べる方は制動巻線をもっている点異なるのみで、設計は大体同一である。したがって巻線方式等は同一である。

第二京大法による巻線の過渡インピーダンスは試験ケースP、Q、およびRに

ついて実測した。その一例を示したのが第3.20図のオシログラムである。

第3.20図 制動巻線を有する場合の巻線の過渡電圧インピーダンスオシロ

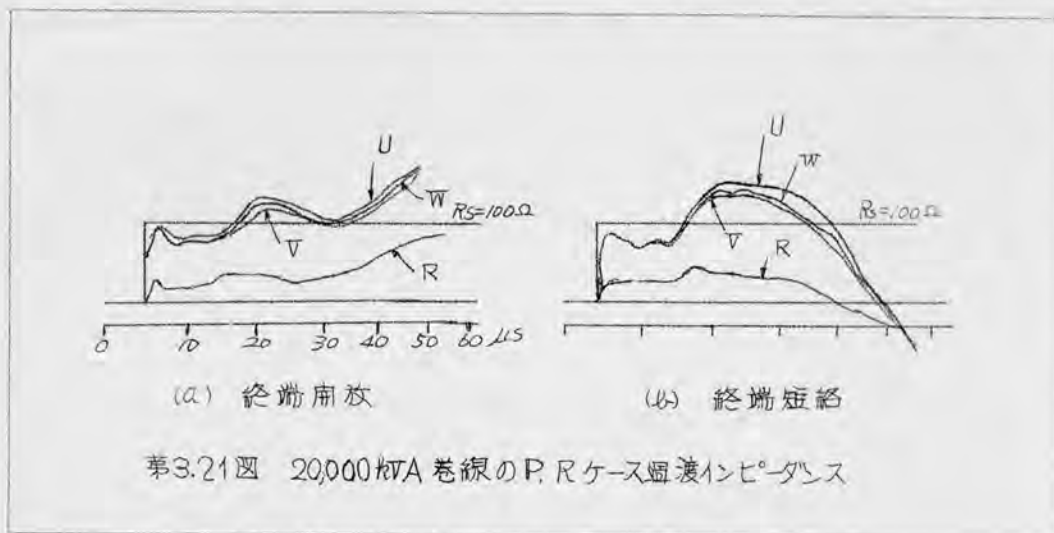


制動巻線による各相巻線の過渡波動インピーダンス波形の相違が第3.19図に示した2800kVAの発電機。各相巻線の過渡波動インピーダンス波形の如く明らかでない。初期の波動インピーダンス、係数率等は附録の第2.7表、第2.8表に示してあるが、各相とも大きな相違がなく、波動インピーダンスは回転子がない場合より小さく180Ωである。

当該発電機の回転子磁極と固定子線輪との相対的位置を時間の都合で調べることはできなかった。

(3) 20,000kVA (11,000V) 発電機

過渡波動インピーダンスは試験ケースP, QおよびRについて実測した。第3.21図のオッシログラムはその一例である。実測の結果回転子磁極の影響が



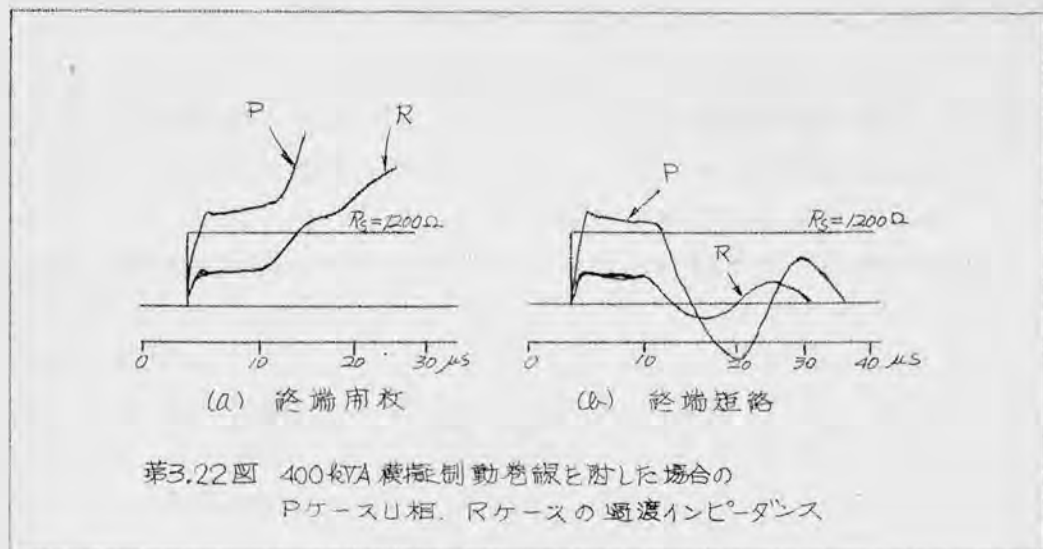
はつきりしないが、上記の11,000kVAの発電機の巻線と同様、各相巻線の過渡波動インピーダンスの相違は極めて小さい。

当該発電機の実測時における固定子線輪と回転子磁極の相対位置は不明である。

(4) 400kVA 発電機

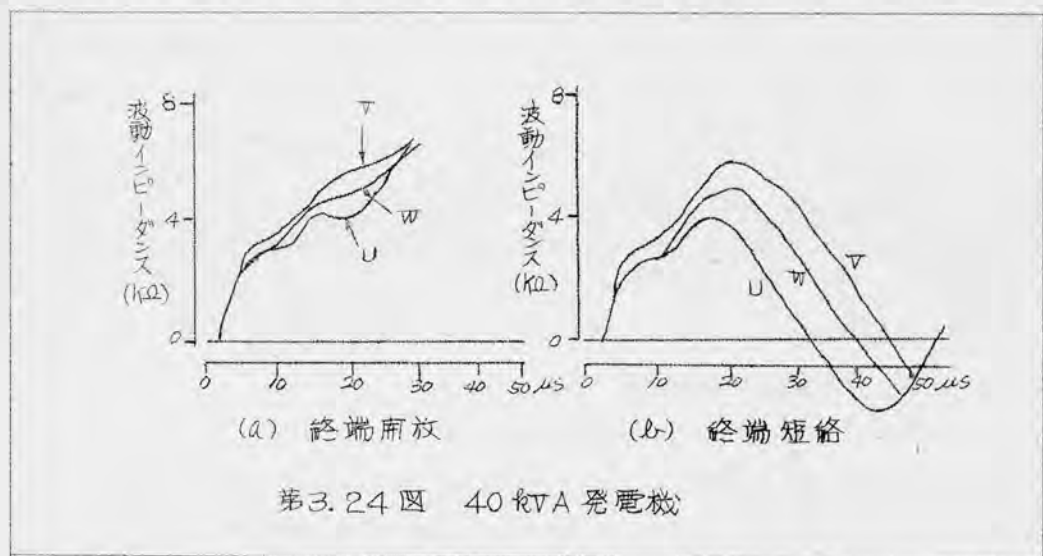
当該発電機巻線の過渡インピーダンスは第2章において回転子がない場合本章の第3.2.1項において回転子がある場合について述べたが、この発電機に模擬制動巻線(附録第2章、第2.2図参照)を取りつけた場合の固定子巻線の過渡インピーダンスを試験ケースP, Q, R, SおよびTについて実測した。第3.22図がオッシログラムの一例である。第3.23図はPケースにおけるU相のみ示したが他のV, W相とも初期についてはU相と同一波形で、反射波が帰って来る辺りから充分異なっている。波動インピーダンスは附録第2.1表に示した如く、模擬の制動巻線であるが、回転子磁極の影響が減じて回転子がない状態の波動インピーダンスに近い。

回転子磁極と固定子巻線との相対的位置は第3.2図に図示した通りである。



(5) 40 kVA 発電機

当該発電機に第3.23図に示す模擬制動巻線を附して、過渡波動インピーダンスを測定した。(オシログラムは附録第2.32図参照)。第3.24図



にPケースの各相過渡波動インピーダンスを示した。この図のオシログラムからは回転子磁極の影響が出ているが、波動インピーダンスは附録第2.16表に示した如く減少し、回転子磁極がない状態より小さい値となっている。

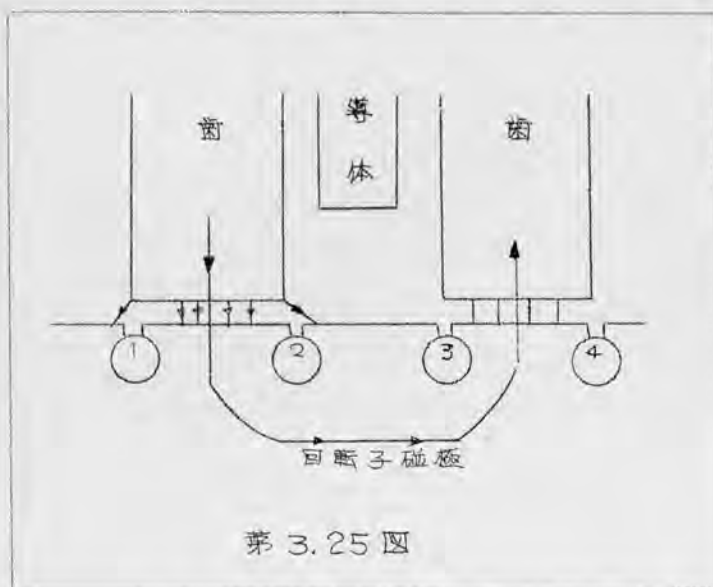
以上制動巻線を附した発電機巻線の過渡波動インピーダンスのオシログラムについて簡単な説明を行った。総括的に纏めると次の通りである。

- (i) 制動巻線を附した発電機巻線の過渡波動インピーダンス波形は回転子がない状態のものに類似した波形である。
- (ii) 初期の波動インピーダンスは制動巻線がない発電機巻線の波動インピーダンスより小さい。発電機によつては回転子がない状態における巻線

の波動インピーダンスより小さい。

3.3.2 制動巻線の過渡波動インピーダンスに与える影響

制動巻線の過渡波動インピーダンスに与える影響については定性的に説明する。固定子溝と制動巻線の位置が第3.25図に示す関係にあるとする。溝内の導体を流れる電流によって生ずる磁束の一部は固定子歯端より回転子並



第 3.25 図

極に入り、第3.25図の矢印で示す磁路を通る。制動巻線の導体には電磁誘導の去則にしたがって起電力が発生し、その起電力によって制動巻線に流れる電流は固定子銀輪よりの磁束を減ずる方向に働き、固定子銀輪の導体の鎖交磁束は減少する。また高周波振動に対しては制動巻線の導体の表面に表皮効果による渦流が

流れ、渦流損を与える。したがって実験で得られたように制動巻線の存在により初期における波動インピーダンスは減少する結果となる。

§ 3.4 回転子巻線の誘起電圧

3.4.1 1000 kVA 発電機の実験結果

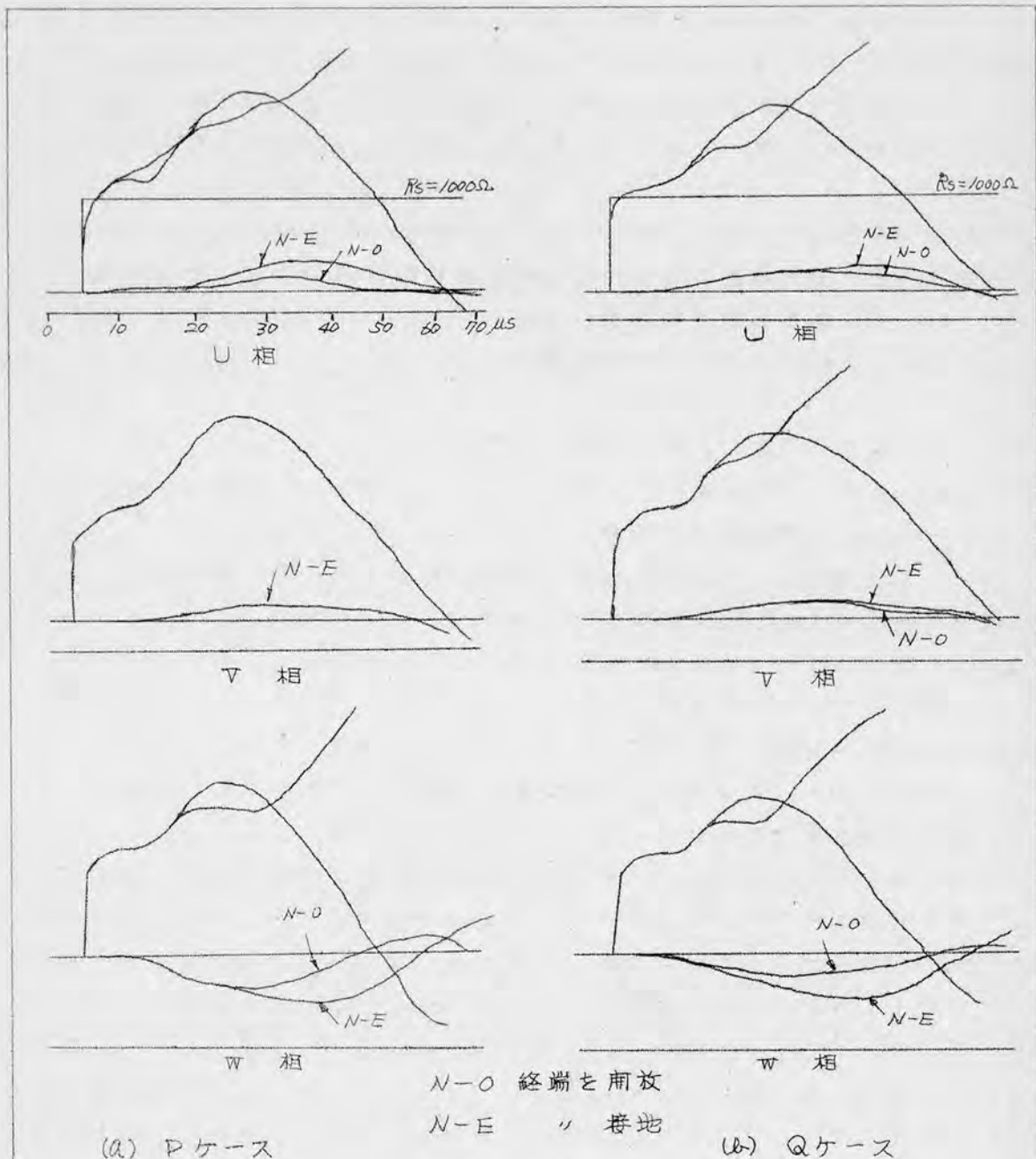
固定子巻線に単位電流を流入した時、回転子巻線の端子に誘起する電圧を測定した。実験結果は第3.26図に1000 kVA 発電機、PおよびQケースにおける各相巻線に単位電流を流入した時の回転子巻線の端子の誘起電圧を示した。回転子磁極と固定子銀輪の関係位置は第3.6図に示す通りで、V相とU相巻線の銀輪は磁極と対面しているが、W相は磁極間に位置している。

第3.26図のオシログラムより次のことが結論づけられる。

- (i) U相とV相は回転子磁極に対面して位置しているので、固定子巻線に単位電流を流入して、巻線の終端で反射が生ずる迄の間は回転子磁極を通じて、回転子巻線に鎖交する磁束がない。したがって第3.26図に見る如くU相とV相の回転子巻線端子に誘起電圧があらわれない。これは磁極鉄心の表皮効果のため、初期においては磁束が鉄心を通りにくいことによる。
- (ii) W相巻線はU相の銀輪が磁極間に位置しているので、W相に単位電流を流入すると一部の磁束は空間を通り、回転子巻線と鎖交するので回転子巻線

には誘起電圧が誘起される。

- (iii) 終端を開放している時は、終端において反射電流波は入来電流波と反対の符号をとり、接地している時は同符号となる。したがって第3.26図のような終端を接地した時の巻線端子の誘起電圧は終端を開放している時の誘起電圧より大きくなる。



第3.26図 1000 kVA発電機の回転子端子誘起電圧

- (Ⅳ) PケースとQケースとでは終端を開放した状態において回転子巻線の誘起電圧が異なっている。すなわちQケースにおいては、誘導による他相巻線を流れる電流による磁束が検試相に流入した電流による磁束と相加している。

3.4.2. 40 kVA 発電機の実測結果

第3.27図に40 kVA 発電機の回転子磁極の頭のみ模擬制動巻線と対した時のTケースに対する回転子巻線端子の電圧を測定したオシログラムを示した。回転子磁極と固定子巻線の関係位置は第3.15図に示した通りで、U相は磁極間に位置しているので第3.26図における同様の結果が得られている。

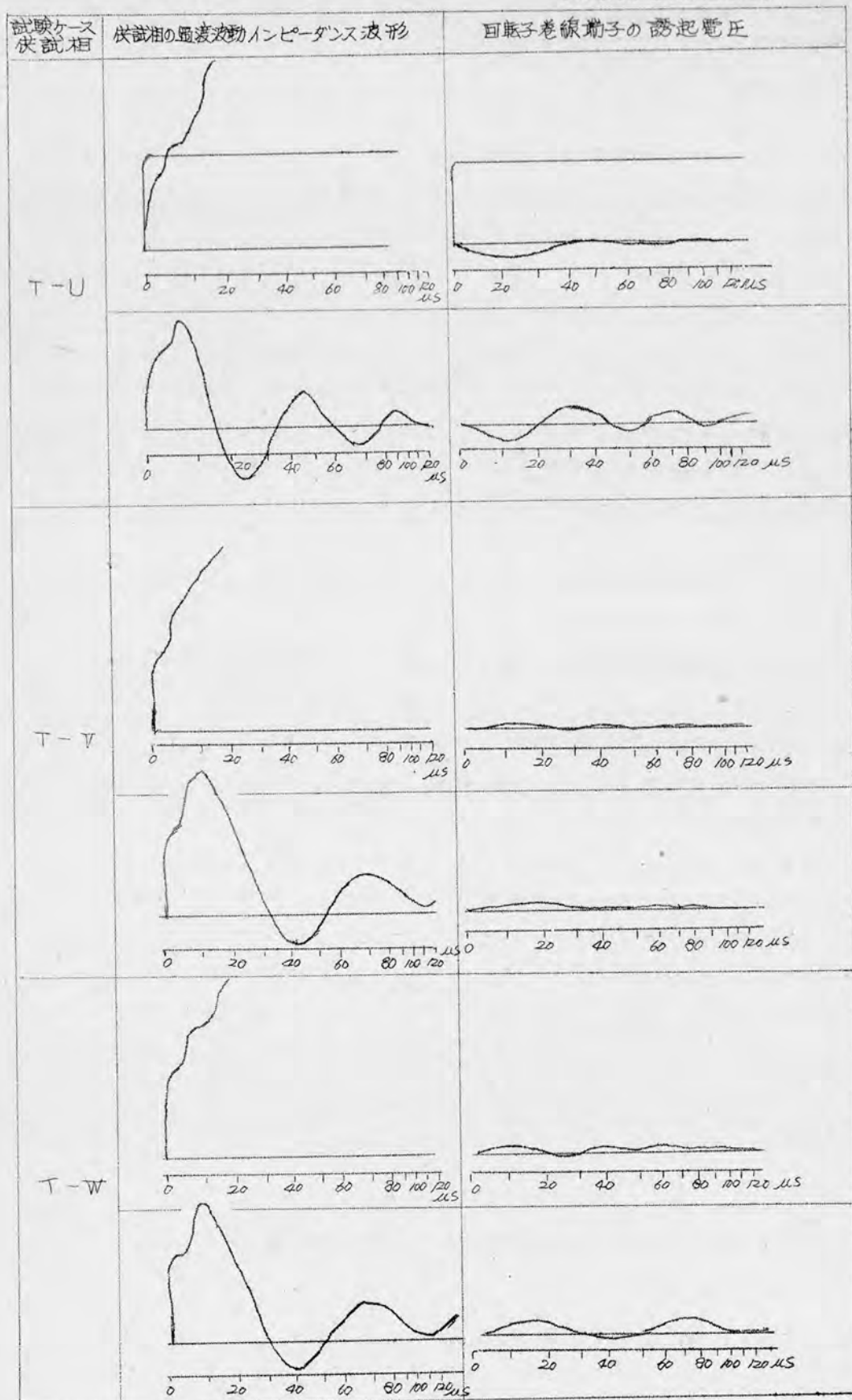
第3.26図は40 kVA, Tケース, U相巻線に単位電流を流入したときの回転子巻線の誘起電圧である。この場合は制動巻線はない。また第3.29図は、回転子に模擬制動巻線と対した時のPケースU相に単位電流を流入した時の回転子巻線の両端子への誘起電圧のオシログラムである。

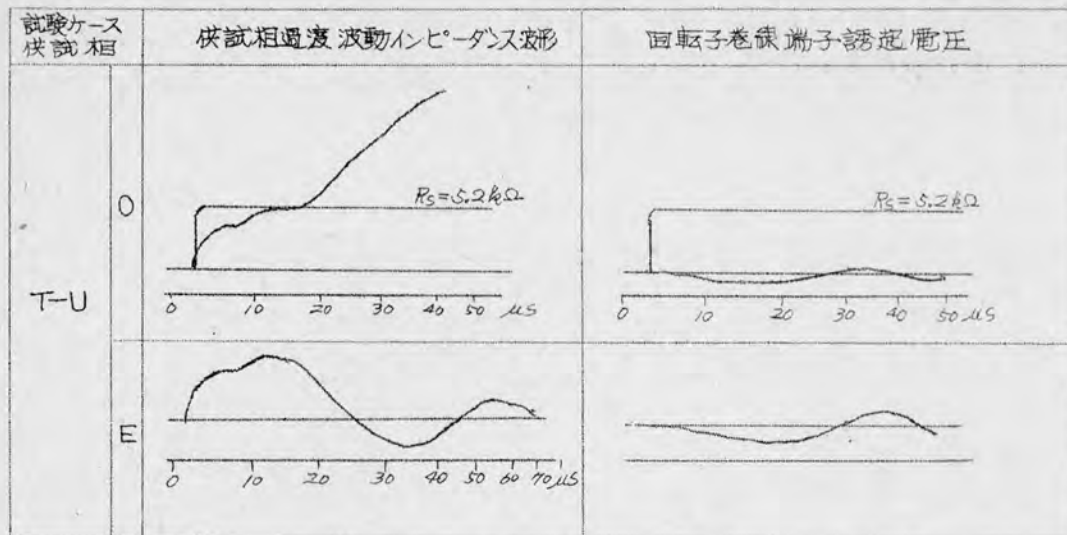
3.4.3. 固定子巻線と回転子巻線との結合について。

固定子巻線と回転子巻線との結合の度合を知るため、巻線の初期のレスポンス電圧と、回転子巻線の両端子に誘起される最大電圧との比をもつて結合度として表示する。その結果が第3.2表である。測定資料が不足であるが、第3.2表より次のことが結論づけられる。

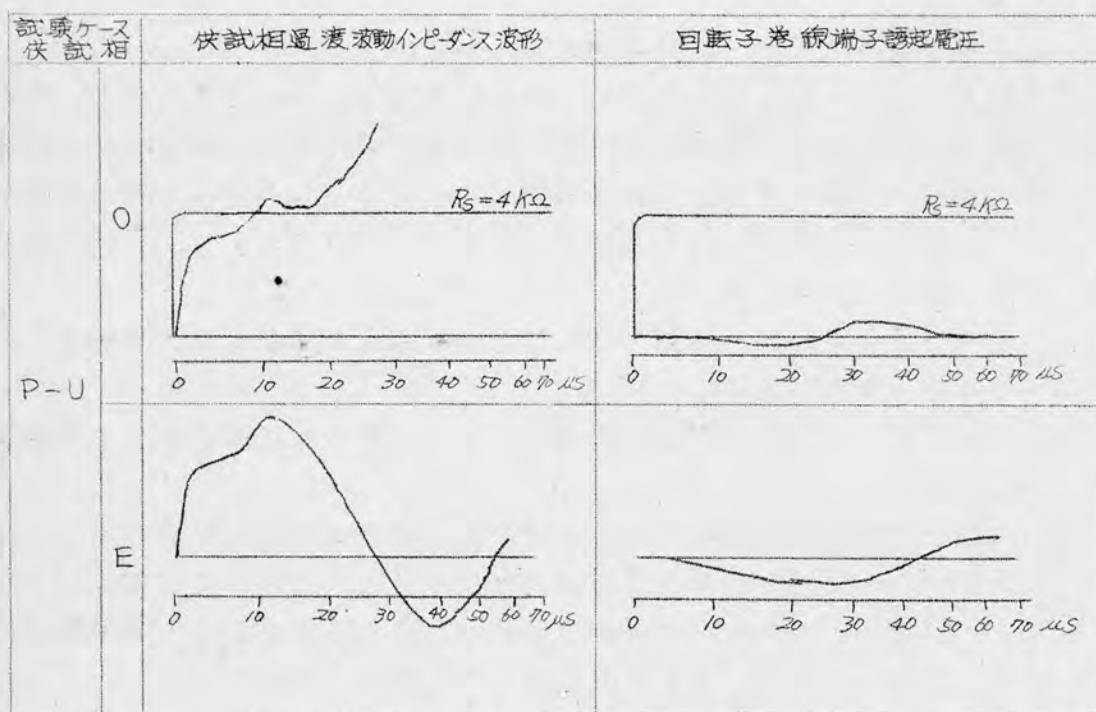
- (i) 模擬制動巻線であるが、制動巻線があるために鉄心を囲む磁束が減少し回転子巻線への誘起電圧は減少する。
- (ii) 試験ケースにより、回転子巻線の誘起電圧は違ってくる。Pケースにおいて最も少い。すなわち、他相巻線に誘導により流れる電流が影響していることを意味している。
- (iii) 巻線の初期波動インピーダンスと固定子巻線と回転子巻線との結合度は逆の傾向を有している。

第3.27図 40kVA 発電機 回転子の誘起電圧 (磁極の頭だけに被検機
動巻線をつけた場合)





第3.28図 40 kVA 回転子誘起電圧 (回転子)



第3.29図 40 kVA 回転子誘起電圧 (模擬制動巻線を付した場合)

第3.2表 固定子巻線と回転子巻線との結合度

発電機容量 (KVA)		試 験 ケース	供試相	結 合 度 合	
				終端開放	終端接地
1000		P	U	0.1	0.2
			V		0.12
			W		0.45
		Q	U	0.17	0.23
			V	0.13	0.15
			W	0.28	0.49
40	模擬制動巻 線(磁極の 間のみ)	T	U	0.16	0.19
			V	0.02	0.08
			W	0.06	0.15
		T	U	0.17	0.30
			U	0.1	0.25

§3.5 結 言

以上本章で述べて来たことを要約すると次の通りである。

1. 回転子が挿入していると回転子極極と対応している固定子巻線の初期波動インピーダンスは漏洩インダクタンスの増加により増すとともに磁極に鉄心の表皮効果のため過渡波動インピーダンス波形の波頭は円珠を帯び、時間の経過につれて波動インピーダンスは増大する。また波頭の衰減は増大する。
2. 回転子巻線の端子を短絡、開放に対し、固定子巻線の過渡波動インピーダンスは影響しない。
3. 制動巻線は固定子巻線の初期波動インピーダンスを減少せしめる効果を有する。
4. 回転子巻線の端子に誘起される電圧は回転子磁極間に位置している固定子巻線に単位電流を流入した時が最も大きく、磁極の間と対応して位置している固定子巻線の場合は磁極鉄心の表皮効果のため、磁極鉄心内を通る磁束は制限され、回転子巻線の誘起電圧は小さい。
5. 制動巻線があると、磁極鉄心内を通る磁束は更に制限され、回転子巻線の誘起電圧は減少する。

104 項欠

第4章 発電機巻線の衝撃波特性(その3)

発電機巻線の線輪の対地電圧，分担電圧，および
回転子巻線への誘導電圧

第4章 発電機巻線の衝撃波特性

(その 3)

(発電機巻線の線輪の対地電圧、分担電圧および回転子巻線への誘導電圧)

§4.1 緒言

本章においては進行波に対する発電機巻線の電圧分布、巻回間および線輪間分担電圧、および回転子巻線の誘導電圧について述べる。

発電機巻線の電圧分布については、E. W. Boehne⁽¹²⁾, F. D. Fielder & E. Beck⁽¹⁶⁾, J. F. Calvert⁽⁹⁾, W. J. Rudge, E. M. Hunter & R. W. Wiseman⁽¹⁷⁾, E. M. Hunter⁽¹³⁾, 大河内重助⁽¹⁸⁾, E. Frideländer⁽¹⁰⁾, B. C. Robinson⁽¹¹⁾ 各位の論文が発表されている。1930年に E. W. Boehne 氏は 2200 V, 6600 V の誘導電動機および 24000 V 同期調相機を供試機として巻線の電圧分布の測定を行っている。この二つの論文の結論は下記の通りである。

1. 侵入波による発電機の巻線の内部電位振動は主として進行波の連続反射によるもので、短い線路に衝撃波を印加した場合に類似している。
2. 振動周波数 f は巻線のインダクタンスを L 、静電容量を C とすると、

$$\text{中性点接地の場合は } f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$\text{中性点非接地の場合は } f = \frac{1}{4\pi\sqrt{LC}}$$

となる。

3. 4000 V, 5000 kVA 同期調相機に波頭長 $0.5\mu s$ の衝撃波を印加し、終端を接地したとき、巻線中の線輪対地電圧の最高は印加端子より2番目と3番目において生じ、その波高値は端子電圧の 106% であった。
4. さらに線輪の最大分担電圧は端子より1番目の線輪で、その波高値は端子電圧の 80% であった。
5. 巻線の巻回間にかかる電圧の大きさは、侵入波の波高値と波頭峻度、巻線の分布静電容量とインダクタンスによって決められる。

大河内氏⁽¹⁸⁾は 1934 年に 120 V, 5 kVA, 50 Hz, 750 R.P.M. の三相交流発電機、2300 V, 35 kVA, 60 Hz, 1200 R.P.M. の三相交流発電機を供試機として、進行波に対する巻線内の電圧分布曲線を求め、巻線の電圧分布について論じている。また 1935 年 E. M. Hunter 氏⁽¹³⁾は線輪の巻回間の電圧分布はその線輪の溝部における巻回間静電容量と対地静電容量とからなる回路網によって決定されることを述べている。1934 年に J. F. Calvert⁽⁹⁾は 25,000 kVA 同期調相機について実験し、理論的に考察を加えている。

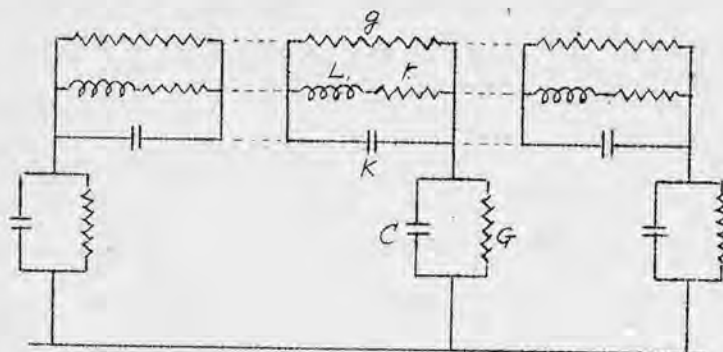
筆者は第4.2節において、1個の線輪の等価回路を四端子回路とし、巻線はその縦続回路として、巻線の電圧分布および線輪の分担電圧の理論式を誘導し、線輪6個直列に接続した場合の巻線の電圧分布および線輪の分担電圧を計算し、これを実験により確かめることにした。第4.3節では線輪6本あるいは12本を用いて、巻線の対地電圧、および分担電圧につき実験的に確かめ、第4.4節では運転状態の発電機巻線の電圧分布を一回より衝撃波が侵入した場合、三相一括して侵入した場合について論じた。第4.5節は巻線の対地電圧に及ぼす回転子磁極の影響、さらに巻線間の電圧不平衡、接地電流の不平衡について述べ、第4.6節では巻線の線輪分担電圧に及ぼす回転子磁極の影響、巻回周分担電圧対線長の関係について述べる。第4.7節においては回転子の誘導電圧について述べる。

§ 4.2 固定子巻線の電位振動に対する理論的考察

固定子巻線の過渡的電位振動の一般的微分方程式を導くのに次の如き仮定を設けた。

1. 線輪中の巻回線の対地静電容量は、その構造上と溝中で上コイルになっているものと下コイルになっているのでは異なるが、これを同一と見做す。さらに巻回線の対地静電容量は固定子鉄心部に集中され、線輪端部においては極めて小さいが、これを一様に分布しているものと見做す。
2. 相互インダクタンスは線輪間および線輪中の各巻回線間にあるが、これらを考慮すると高次微分方程式となるので、一応無視して考える。したがって各巻回線のインダクタンスは一様に分布していると考え、
3. 他相巻線の存在のため、相互インダクタンスおよび誘導係数を考慮しなければならないが、これを無視する。
4. 線輪間の渡り線の伝播速度は溝部の巻回線のそれの約10倍程度であるので、渡り線は無視する。

今巻回数 n なる線輪の等価回路を図示すると、第4.1図となる。線輪-1巻回線に対する回路定数を下記の通りに定める。



第4.1図 線輪の等価回路

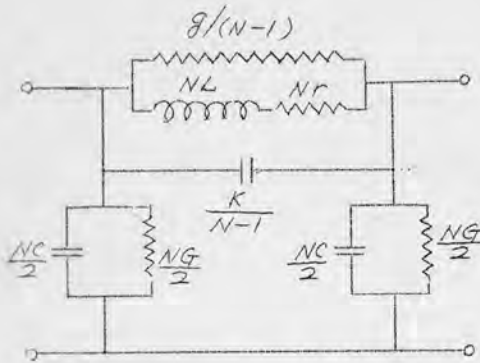
- L : 1巻回線のインダクタンス
- C : 大地に対するキャパシタンス
- K : 巻回線間のキャパシタンス
- G : 大地に対する分路コンダクタンス
- g : 巻回線間の分路コンダクタンス

r : 1巻回線の直列抵抗

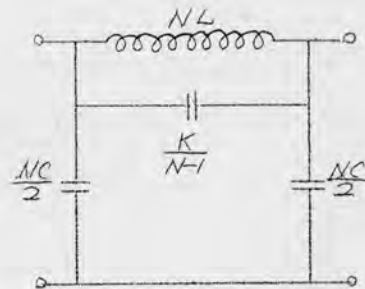
N : 巻回線数

4.2.1 1相分の巻線を四端子縦続回路として考察した場合の理論式

線輸1本に対する等価回路は第4.1図に図示した通りである。巻線は線輸が数個から数十個直列に接続された回路であるので、第4.1図の等価回路を巻線の線輸数だけ縦続に接続した縦続回路としてあらわすことができる。第4.1図の等価回路は回路が複雑であるので、これを第4.2図の如く梯子型第1種の簡単な等価回路とする。さらに損失を無視すると、第4.2図は第4.3図の等価回路となる。



第4.2図



第4.3図

今梯子型四端子回路を n 個縦続に接続した回路の入力端子電圧 $e_a(p)$ 、電流 $i_a(p)$ 、出力端子の電圧、電流を $e_e(p)$ 、 $i_e(p)$ とすると、次の関係が成立する。

$$\begin{pmatrix} e_a \\ i_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_e \\ i_e \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

ただし、 A_n 、 B_n 、 C_n 及び D_n は p の関数で表示した四端子定数で、梯子型四端子回路の四端子定数を A 、 B 、 C 、 D とすると、

$$\begin{pmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}^n \quad (4.2)$$

であらわされる。さらに、第4.3図の等価回路において基本回路が左右対称である場合は、 $A=D$ となり、したがって $A_n=D_n$ となる。それ故に(4.1)式は(4.3)式と書き改め得る。すなわち、

$$\begin{pmatrix} e_a \\ i_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_n & B_n \\ C_n & A_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_e \\ i_e \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

(4.3)式中の四端子定数を双曲線関数で表わすと次式となる。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} A_n &= \cosh n\theta \\ B_n &= Z \sinh n\theta \\ C_n &= \frac{1}{Z} \sinh n\theta \\ Z &= \sqrt{\frac{B_n}{C_n}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4.4)$$

$$\theta = \sqrt{\frac{N(N-1)LCp^2}{N-1+NLKp^2}}$$

ただし、 θ は基本回路の伝播量であって、 p の函数である。

さらに、 m 番目と $(m+1)$ 番目との境の電圧、電流を $e_m(p)$, $i_m(p)$ とすると、終端の電圧、電流との関係は (4.5) 式と同様にあらわされる。すなわち、

$$\begin{pmatrix} e_m \\ i_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_m & B_m \\ C_m & A_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_e \\ i_e \end{pmatrix} \dots\dots\dots (4.5)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} A_m &= \cosh (n-m)\theta \\ B_m &= Z \sinh (n-m)\theta \\ C_m &= \frac{1}{Z} \sinh (n-m)\theta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4.6)$$

である。

(1) 終端を開放した場合の各接続点の電圧

終端を開放すると $i_e(p) = 0$ である。それ故に (4.3), (4.5) 式より

$$\left. \begin{aligned} e_m &= e_a \frac{A_m}{A_n} = e_a \frac{\cosh (n-m)\theta}{\cosh n\theta} \\ i_m &= e_a \frac{C_m}{A_n} = e_a \frac{\sinh (n-m)\theta}{Z \cosh n\theta} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4.7)$$

$e_a = E1$ のとき、(4.7) 式は展開定理により $e_m(p)$ の時間函数 $E_m(t)$ を求めると (4.8) 式となる。すなわち、

$$E_m(t) = \left[\frac{A_m}{A_n} \right] E1 + \sum_{p=0} \frac{\cosh (n-m)\theta}{p \left(\frac{d \cosh n\theta}{dp} \right)_{p=p_r}} \cdot \varepsilon^{pt} E1 \dots\dots\dots (4.8)$$

ただし、 p_r は $\cosh n\theta = 0$ の根である。

第 4.3 図の四端子定数 A は次式であらわされる。すなわち、

$$A = 1 + \frac{p^2 N^2 L C}{2 \{ 1 + p^2 N(N-1) L K \}} \dots\dots\dots (4.9)$$

となり、 A は定数であるので、

$$A = \cosh \theta = \cosh \frac{(2k-1)\pi}{2n} \dots\dots\dots (4.10)$$

ただし、 $k = 1, 2, 3, \dots, n$

となる。

$$\begin{aligned} \cosh (n-m)\theta &= \cosh n\theta \cosh m\theta - \sinh n\theta \sinh m\theta \\ \cosh n\theta &= 0 \end{aligned}$$

上の二式より,

$$\cos h(n-m)\theta = -\sinh n\theta \sinh m\theta \quad (4.11)$$

$$\frac{d}{dp}(\cos h n\theta) = \frac{d(\cos h n\theta)}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{d(\cos h \theta)} \cdot \frac{d(\cos h \theta)}{dp}$$

$$\left\{ \frac{d(\cos h n\theta)}{dp} \right\}_{p_\mu} = \frac{n \sinh n\theta}{\sinh h\theta} \cdot \left(\frac{dA}{dp} \right)_{p_\mu} \quad (4.12)$$

(4.8)式は, (4.10), (4.11), (4.12) とから

$$E_m(t) = \left[\frac{A_m}{A\pi} \right]_{p=0} E 1 + \sum_p \frac{\sin \frac{(2k-1)\pi}{2n} \cdot \sin \frac{(2k-1)m\pi}{2n}}{n p_\mu \left[\frac{dA}{dp} \right]_{p_\mu}} \cdot \varepsilon^{p_\mu t} E 1 \quad (4.13)$$

(4.9)式と(4.10)式とより, p_μ の根は,

$$1 + \frac{p_\mu^2 N^2 L C}{2 \{ 1 + p_\mu^2 N(N-1) L K \}} = \cos \frac{(2k-1)\pi}{2n}$$

$$\therefore p_\mu = \pm j \frac{2}{\sqrt{L_0 C_0}} \cdot \frac{\sin \frac{(2k-1)\pi}{4n}}{\sqrt{1 + 4 \frac{K_0}{C_0} \sin^2 \frac{(2k-1)\pi}{4n}}} \quad (4.14)$$

また,

$$\left. \begin{aligned} L_0 &= NL \\ C_0 &= NC \\ K_0 &= (N-1)K \end{aligned} \right\} \quad (4.15)$$

次に,

$$p_\mu \left[\frac{dA}{dp} \right]_{p_\mu} = \frac{p_\mu^2 L_0 C_0}{(1 + p_\mu^2 L_0 K_0)} \quad (4.16)$$

上式に p_μ の根を代入すると,

$$p_\mu \left[\frac{dA}{dp} \right]_{p_\mu} = -4 \sin^2 \frac{(2k-1)\pi}{4n} \cdot \left(1 + 4 \frac{K_0}{C_0} \sin^2 \frac{(2k-1)\pi}{4n} \right) \quad (4.17)$$

$p=0$ に対して(4.9)式より

$$\left. \begin{aligned} \cos h \theta &= 1 \\ \text{したがって} \\ \theta &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.18)$$

それ故に,

$$\left[\frac{A_m}{A\pi} \right]_{p=0} = 1 \quad (4.19)$$

(4.13)式に(4.14), (4.17), (4.19)式を代入すると, 第4.3図の四端子回路を n ヶ連続に接続した回路の終端を開放した時の各接続点の電圧を求める一般式が得られる。すなわち,

$$E_m(t) = E1 - \frac{1}{2n} \sum_{k=1}^n \frac{\sin \frac{(2k-1)\pi}{2n} \cdot \sin \frac{(2k-1)m\pi}{2n}}{\sin^2 \frac{(2k-1)\pi}{4n} (1 + 4\alpha^2 \sin^2 \frac{(2k-1)\pi}{4n})} E1 \cdot \cos \left\{ 2\omega \cdot \frac{\sin \frac{(2k-1)\pi}{4n}}{\sqrt{1 + 4\alpha^2 \sin^2 \frac{(2k-1)\pi}{4n}}} t \right\} \quad (4.20)$$

ただし

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \\ \alpha^2 &= \frac{K_0}{C_0} \end{aligned} \right\} \quad (4.21)$$

(2) 終端を短絡した場合の各接続点の電圧

終端を短絡すると、 $e_e(p) = 0$ であるので (4.3), (4.5) 式より

$$e_m = e_a \frac{B_m}{B_n} = e_a \frac{\sinh(n-m)\theta}{\sinh n\theta} \quad (4.22)$$

m の展開において (4.22) 式の固有値は次式から求められる。

$$\sinh n\theta = 0 \quad (4.23)$$

その固有値は

$$\left. \begin{aligned} \theta_k &= (\pm j) \frac{k\pi}{n} \\ k &= 1, 2, \dots, (n-1) \end{aligned} \right\} \quad (4.24)$$

展開定理により $e_m(p)$ の時間函数 $E_m(t)$ を求める。

$$E_m(t) = \left\{ \frac{\sinh(n-m)\theta}{\sinh n\theta} \right\} E1 + \sum_{r=0} \sum_v \frac{\sinh(n-m)\theta_k \cdot \sinh \theta_k}{n p_v \cosh n\theta_k \left\{ \frac{dA}{dp} \right\}_{p_v}} \cdot e^{p_v t} E1 \quad (4.25)$$

(4.23) 式を考慮に入れて

$$\sinh(n-m)\theta_k = -\cosh n\theta_k \cdot \sinh m\theta_k \quad (4.26)$$

しかして θ_k の値に (4.24) 式を入れて (4.25) 式は次の如く簡略化される。

$$E_m(t) = \left\{ \frac{\sinh(n-m)\theta}{\sinh n\theta} \right\} E1 + \sum_{r=0} \frac{\sin \frac{k\pi}{n} \sin \frac{m\pi}{n}}{n p_v \left\{ \frac{dA}{dp} \right\}_{p_v}} \cdot e^{p_v t} E1 \quad (4.27)$$

第 4.3 図の四端子回路より

$$\cosh \theta_k = 1 + \frac{p_v^2 L_0 C_0}{2(1 + p_v^2 L_0 K_0)} \quad (4.28)$$

(4.28) 式に (4.29) 式を代入すると次式をうる。

$$1 + \frac{P^2 L_0 C_0}{2(1 + P^2 L_0 K_0)} = \cos \frac{k\pi}{n} \quad (4.29)$$

$$k_r = \pm j \frac{2 \sin \frac{k\pi}{n}}{\sqrt{L_0 C_0 + 4 L_0 K_0 \sin^2 \frac{k\pi}{2n}}} \quad (4.30)$$

第 4.3 図の四端子回路において

$$\sin \frac{1}{2} \theta = \frac{A-1}{2} = \frac{P^2 L_0 C_0}{4(1 + P^2 L_0 K_0)}$$

$$\therefore \sinh \frac{1}{2} \theta = \frac{1}{2} \frac{P \sqrt{L_0 C_0}}{\sqrt{1 + P^2 L_0 K_0}} \quad (4.31)$$

が成立するが、 P が小さい値の時には近似的に

$$\theta = \frac{P \sqrt{L_0 C_0}}{\sqrt{1 + P^2 L_0 K_0}} \quad (4.32)$$

と置き

$$\left\{ \frac{\sinh k(n-m)\theta}{\sinh n\theta} \right\}_{p=0} = \frac{n-m}{n} \quad (4.33)$$

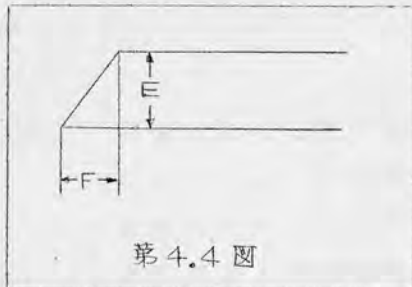
$P_r \left\{ \frac{dA}{dp} \right\}_{p_r}$ に対して P_r の値を代入し、(4.27) 式は

$$E_m(t) = \frac{n-m}{n} E_1 - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n-1} \frac{\sin \frac{k\pi}{n} \cdot \sin \frac{nk\pi}{n} \cdot E_1}{2n \sin^2 \frac{k\pi}{2n} \cdot (1 + 4d^2 \sin^2 \frac{k\pi}{2n})} \cdot \cos \frac{2\omega \sin \frac{k\pi}{2n}}{\sqrt{1 + 4d^2 \sin^2 \frac{k\pi}{2n}}} t \quad (4.34)$$

ただし、 $\omega = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}$

$$d^2 = \sqrt{\frac{K_0}{C_0}}$$

となる。従って (4.34) 式は終端を短絡した時の継続回路の各接続点の電圧を表わす式である。



第 4.4 図

印加波が第 4.4 図に示すように波頭が三角波の場合は (4.34) 式は (4.35) となる。

すなわち

$$E_m(t) = \frac{n-m}{n} E - \sum \frac{AE}{BF} 2 \sin \frac{FB}{2} \cos B(t - \frac{E}{2}) \quad (4.35)$$

$$\text{但し } A = \frac{\sin \frac{k\pi}{n} \cdot \sin \frac{m k \pi}{n}}{2n \sin^2 \frac{k\pi}{2n} \cdot (1 + 4\alpha^2 \sin^2 \frac{k\pi}{2n})}, \quad B = \frac{2\omega \sin \frac{k\pi}{2n}}{\sqrt{1 + 4\alpha^2 \sin^2 \frac{k\pi}{2n}}}$$

$$E = \begin{cases} E & t > F \\ \frac{E}{F} t & t < F \end{cases}$$

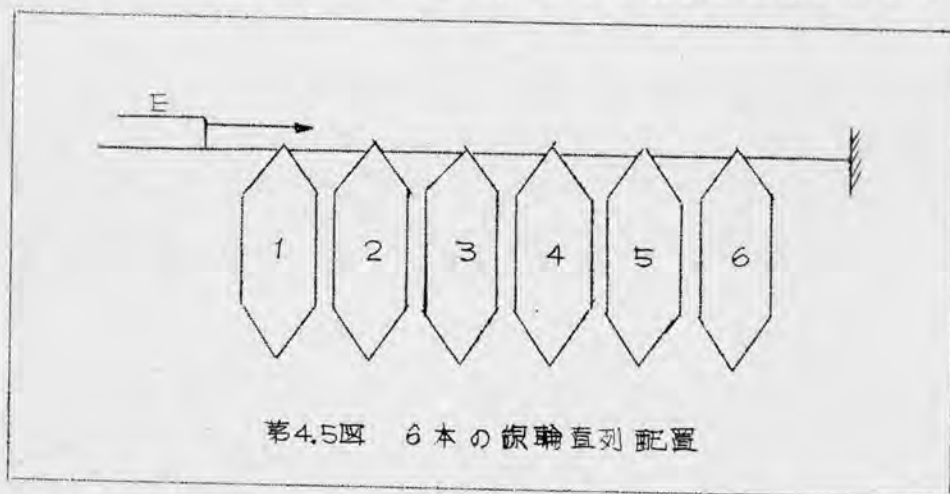
(3) 線輪の分担電圧

巻線中 m 番目の線輪分担電圧 $V_m(t)$ は次式より求められる。すなわち

$$V_m(t) = E_{m-1}(t) - E_m(t) \quad (4.36)$$

4.2.2. 理論式に対する検討

上記に求めた理論式に対する検討を 4375 kVA (12 kV) 発電機の線輪 6 本を使用して行った。線輪の配置は第 4.5 図に示す通り 6 本の線輪を直列に接続し、終端を接地し、各線輪の対地電圧、および線輪分担電圧を測定した。供



試線輪は巻回数が11回巻のもので、線輪端部まで鋸屑を貼りつけた。線輪1本の常数は次の通りである。

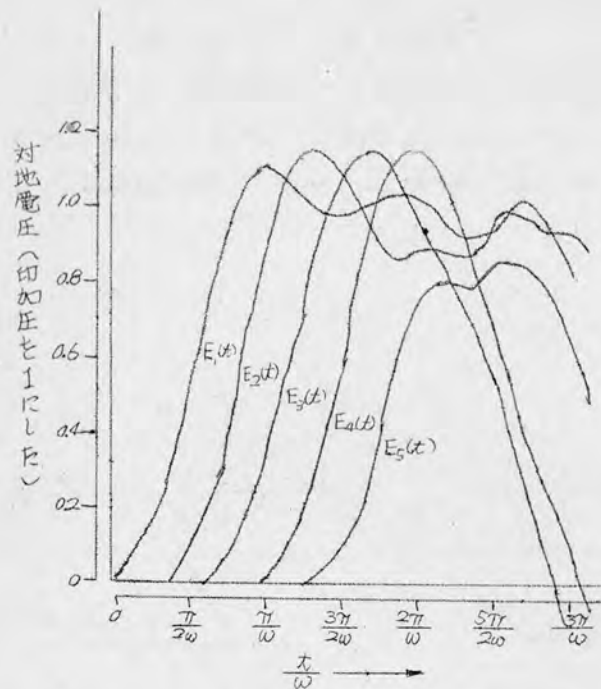
$$C_0 = 2020 \text{ pF},$$

$$L_0 = 179 \text{ } \mu\text{H}$$

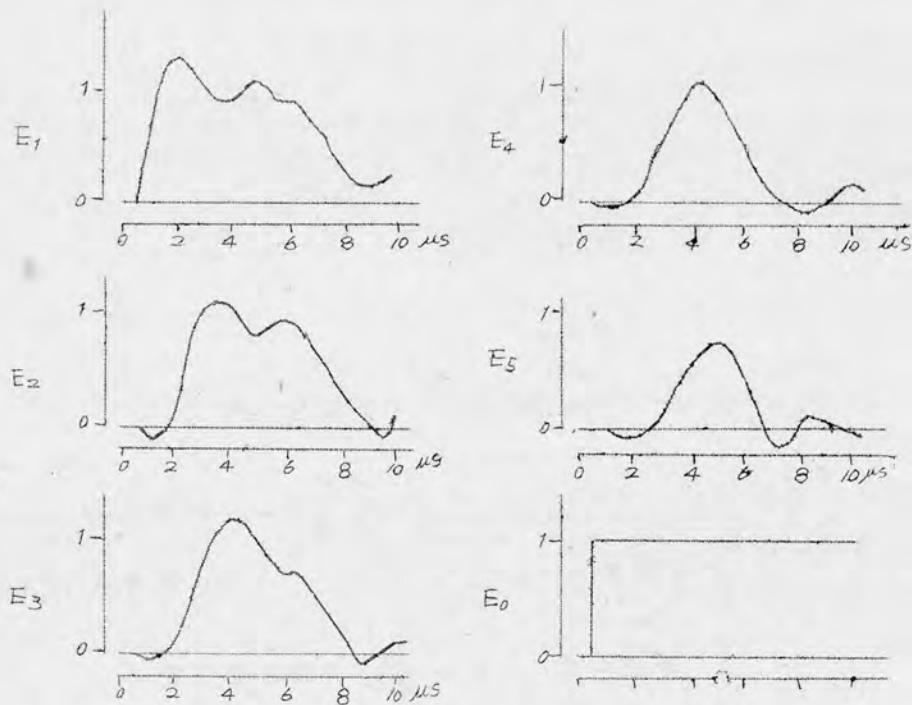
$$K_0 = 260 \text{ pF}$$

したがって $\omega = 1.66$, $\alpha^2 = \frac{1}{\pi.8}$ となる。数値計算には K_0 が測定していなかったため $\alpha^2 = \frac{1}{6}$ として計算した。印加波を矩形波 $\omega, \alpha^2, n=6$ として (4.34) 式により計算した結果は第 4.6 図に示す。また実測した各線輪端子のオッシログラムは第 4.7 図に示す。この両図から、計算結果と実測結果がよく一致している。

次に線輪分担電圧については (4.35) 式を使用し、 $F = \frac{\pi}{4\omega}$, $F = \frac{\pi}{2\omega}$ に



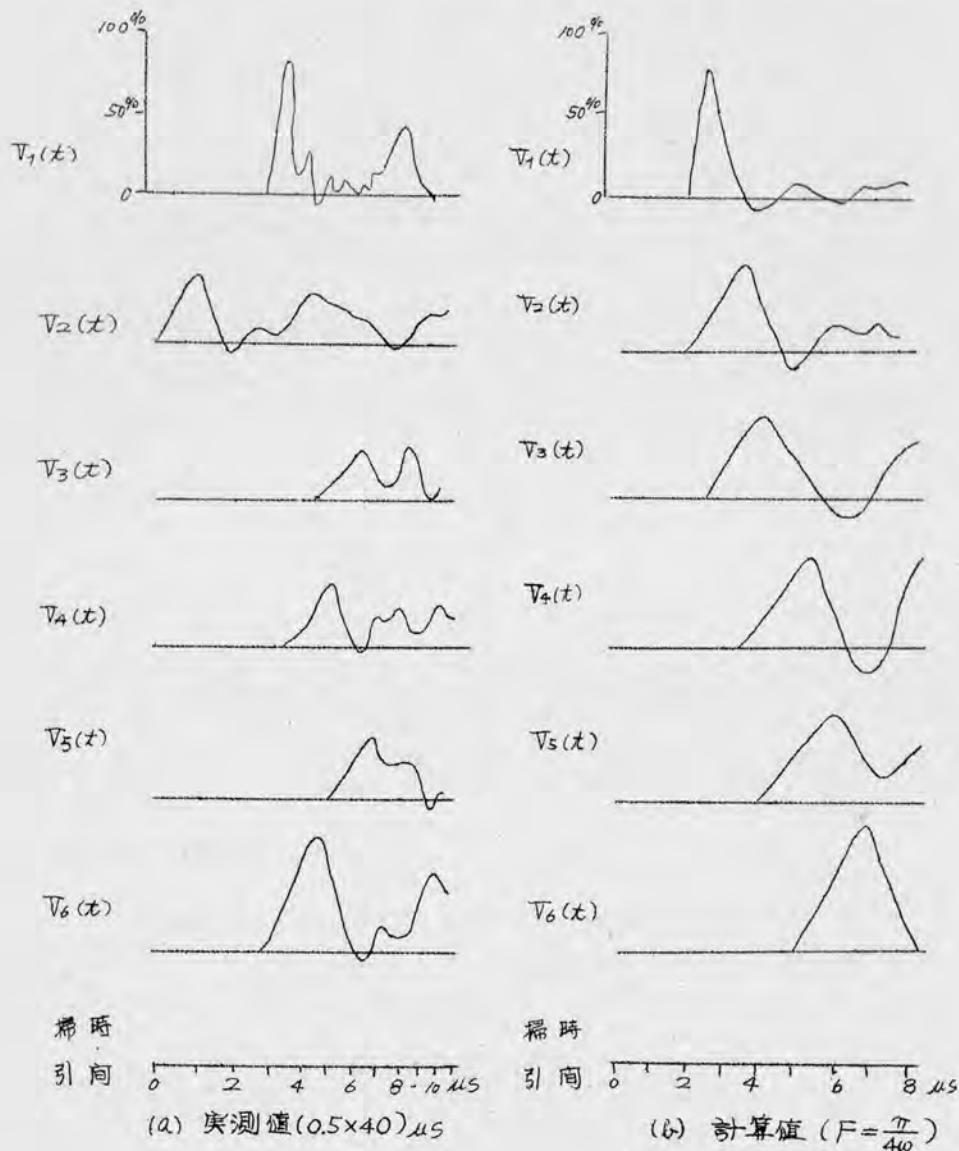
第4.6図 矩形波として計算した対地電圧



第4.7図 矩形波を印加した時の線対地電圧

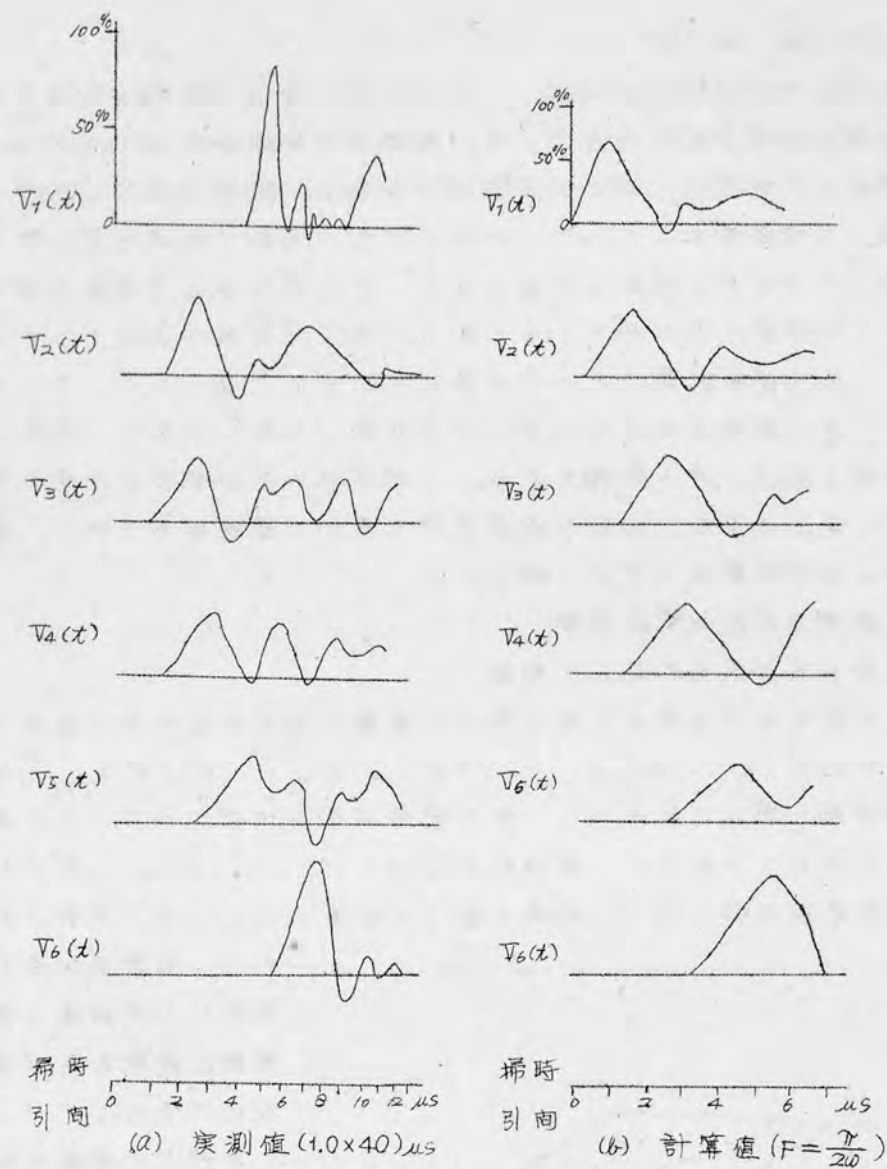
ついて計算した。 $\frac{\pi}{4\omega} = 0.47\mu s$, $\frac{\pi}{2\omega} = 0.94\mu s$ であるので、実測における波頭長は $0.5\mu s$, $1.0\mu s$ とした。 $F = \frac{\pi}{4\omega}$ に対する分担電圧と (0.5×40)

μs に対する分担電圧のオシロを第4.8図、 $F = \frac{\pi}{240}$ に対するものを第4.9図に示した。線路分担電圧の波形は計算結果が実測値とよく似ている。各線路の分担電圧を曲線にて示したのが第4.10図で、計算に使用した波形は波尾長が無限大であるので、終端に近い線路の分担電圧は実測値より大きくなっているが、曲線の形はよく一致している。

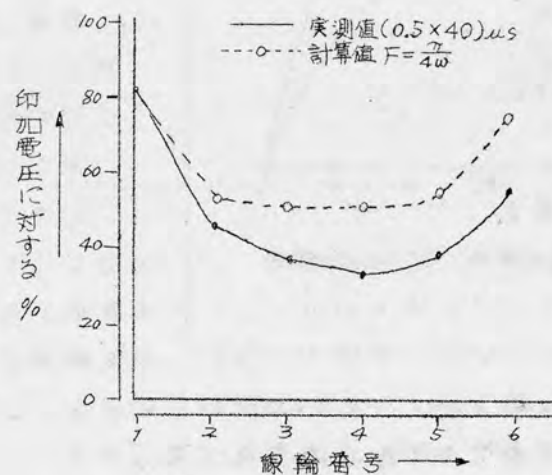


第4.8図 $F = \frac{\pi}{240}$ の時の分担電圧

以上1本の線路を梯子型四端子回路とし、巻線とこの縦続回路として理論式を誘導し、線路6本を直列に接続した場合の計算結果と実測結果を比較検討し線路が直列接続の場合には理論式がよく実測値と一致することを確認した。従って、発電機巻線は線路と第1種梯子型四端子回路と考え、その縦続回路として考えることができる。



第4.9図 $F = \frac{\pi}{2\omega}$ に対する線間分相電圧



第4.10図 線間分相電圧曲線

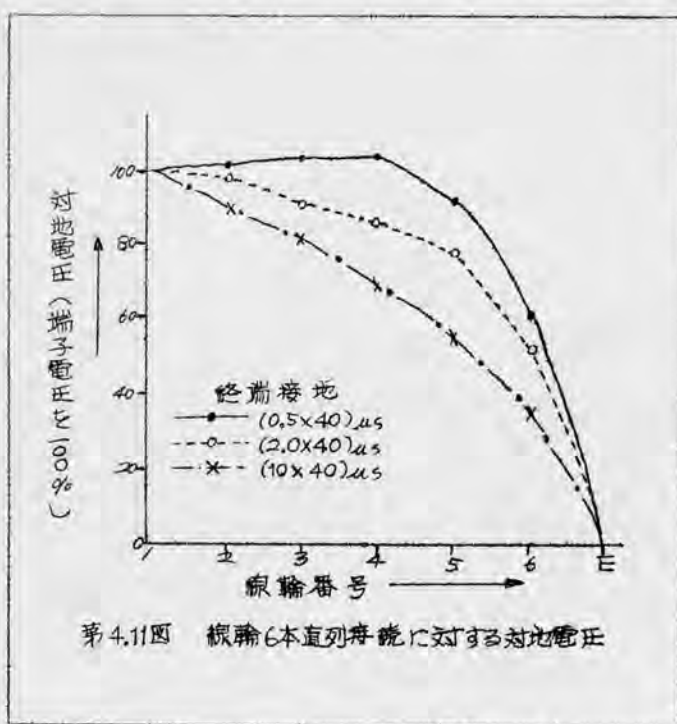
5.4.3. 基礎実験

第4.2節では線路間の相互インダクタンスおよび導線の抵抗は無視し、梯子型両端子回路の縦続回路として、巻線中の線路の端子における対地電圧および線路の分担電圧に関する理論式を誘導し、線路が直列に接続された巻線に適用して理論式が正しいことが分かったが、実際の線路配置は第4.5図に図示するような簡単な線路の配置でなく、第1章の供試発電機巻線の展開図に見る通りの線路配置であり、かつ第6.1表に示す通り相互インダクタンスがあり、これを線路配置によっては無視するわけにはいかない。さらに印加波の波頭長により線路の対地電圧および分担電圧も変ってくる。筆者は線路の巻部に錫箔を貼りつけた線路を使用し、発電機の線路配置と同様に線路を配置し、印加波の波頭長、および終端条件を変えて基礎実験を行い、線路の対地電圧および分担電圧を求め、検討することにした。

4.3.1 巻線中の対地電圧分布

(1) 線路6本を直列接続した巻線

第4.2節における第4.5図に用いた線路を第4.5図の通り直列に接続した場合、印加波 $(0.5 \times 40)\mu s$ 、 $(2.0 \times 40)\mu s$ および $(10 \times 40)\mu s$ に対する巻線中の線路端子電圧を測定した。その結果は第4.11図に示す。この結果から印加波の波尾長を一定とし、波頭長が $0.5\mu s$ 、 $2\mu s$ 、 $10\mu s$ と長くなる程巻線中の対地電圧は低くなり、終端に近づく程著しい。これは巻線の長さが短い



第4.11図 線路6本直列接続に対する対地電圧

ので、波頭長が長くなると終端よりの反射波が端子近くの線路対地電圧をも低下させるからである。

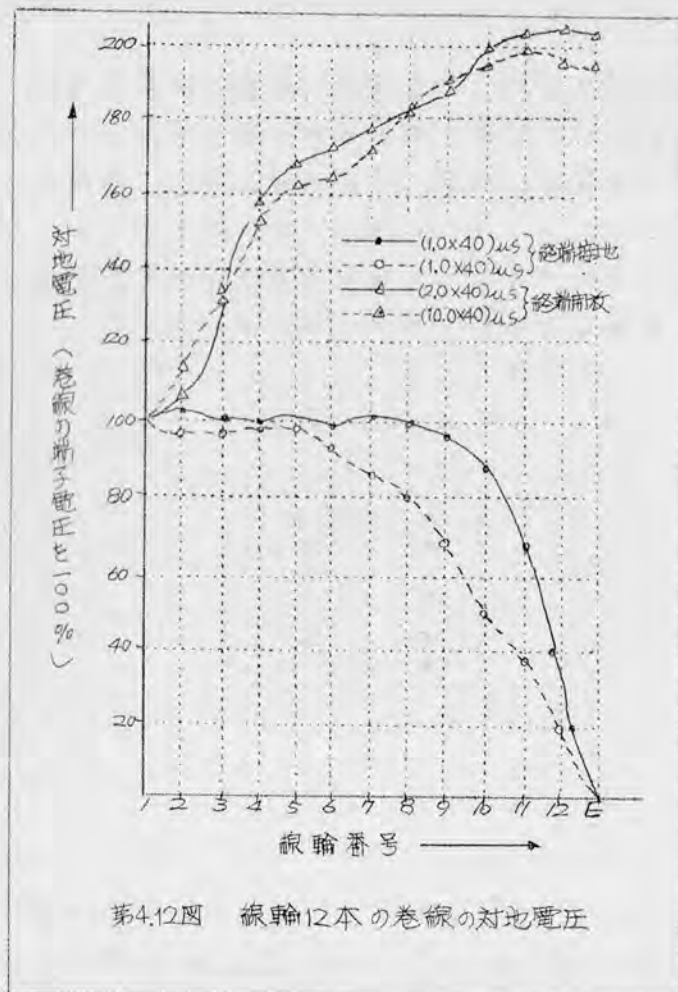
巻線中の線路対地電圧の最大は印加波 $(0.5 \times 40)\mu s$ における3,4番目の線路で端子電圧の102%である。

(2) 線路12本を毎極毎相の誘導3,4極に接続した場合の対地電圧

第2.14図(a)に示した如く、12本の線路(供試線路は上述したものと同一である。)を接続した巻線の線路端子電圧を終端条件として、接地、

開放、印加波を $(0.5 \times 40)\mu s$ 、 $(2.0 \times 40)\mu s$ 、および $(10 \times 40)\mu s$ として測定した。その結果も曲線で示したのが第4.12図である。

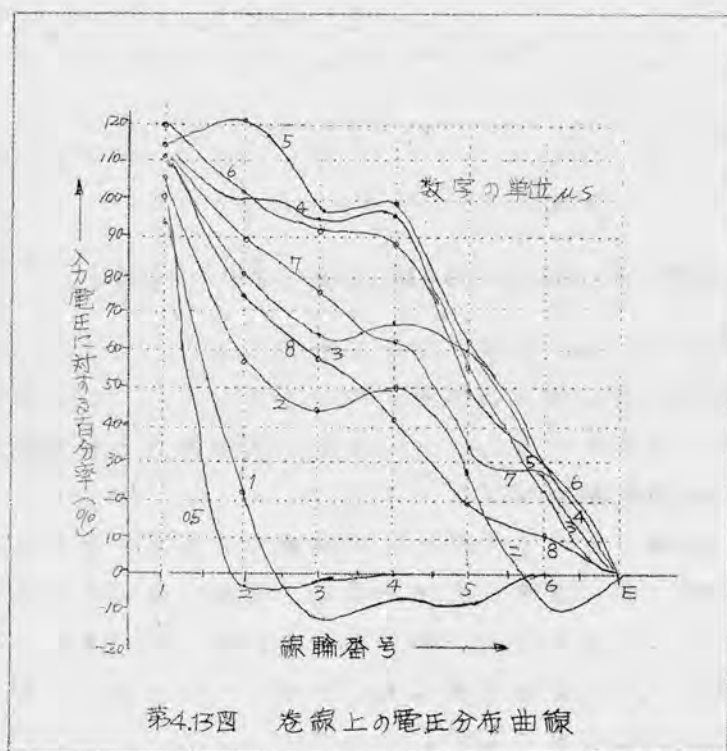
終端接地においては前述した6本の線路を直列接続した場合の対地電圧曲



脈と同一である。終端を用
放した時の終端線巻の対地
電圧は始端電圧の大体2倍
である。これは線巻が鉄心
に納まっていないので、波頭
の減衰がないためである。

(3) 巻線の電圧分布曲線

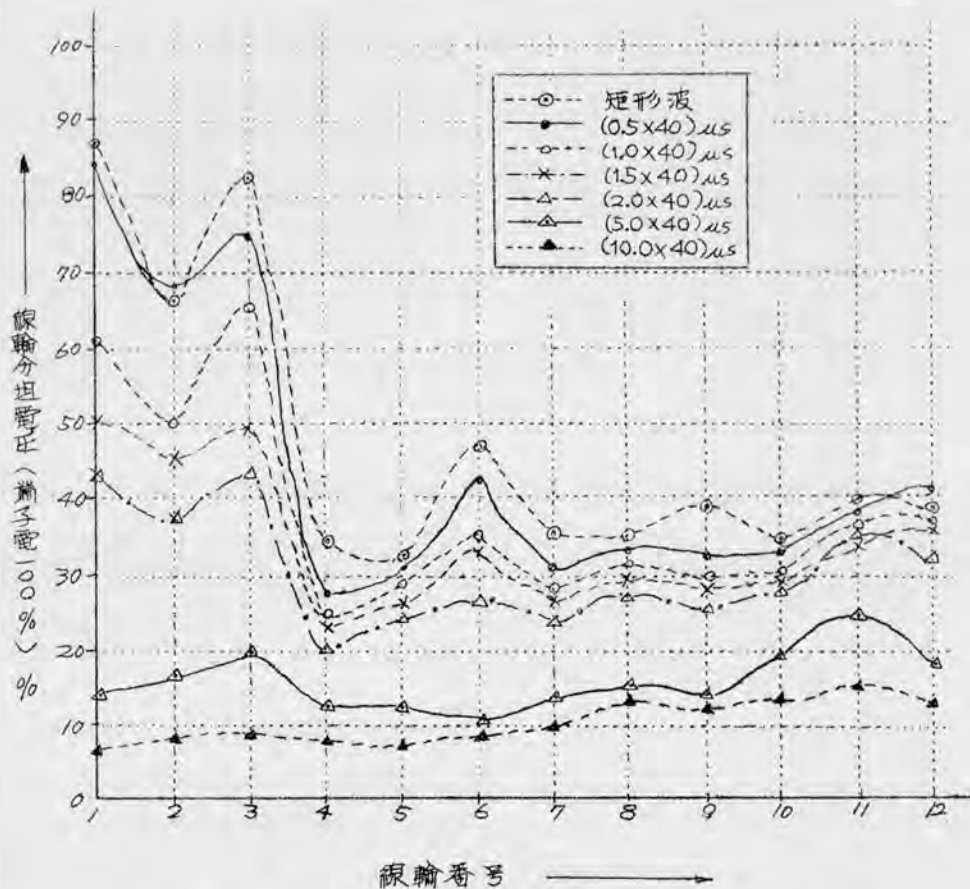
6本の線巻を直列に接続
した巻線に矩形波を印加し
た時の電圧分布曲線を求め
た。第4.13図はその電圧分
布曲線である。電圧分布曲
線については大河内氏^⑧が
求めているが、急峻な波頭
をもつた進行波が巻線端子
に到達すると端子に近い線
巻に全波高電圧が加わり、
波頭が終端に達した後は
全線巻に波高電圧は一樣に
分布される。その時の電圧
振動の様子は第4.13図より
知ることができる。



4.3.2 線輪の分担電圧

(1) 線輪12本を毎極、毎相の薄3, 4極、隔極接巻における線輪分担電圧

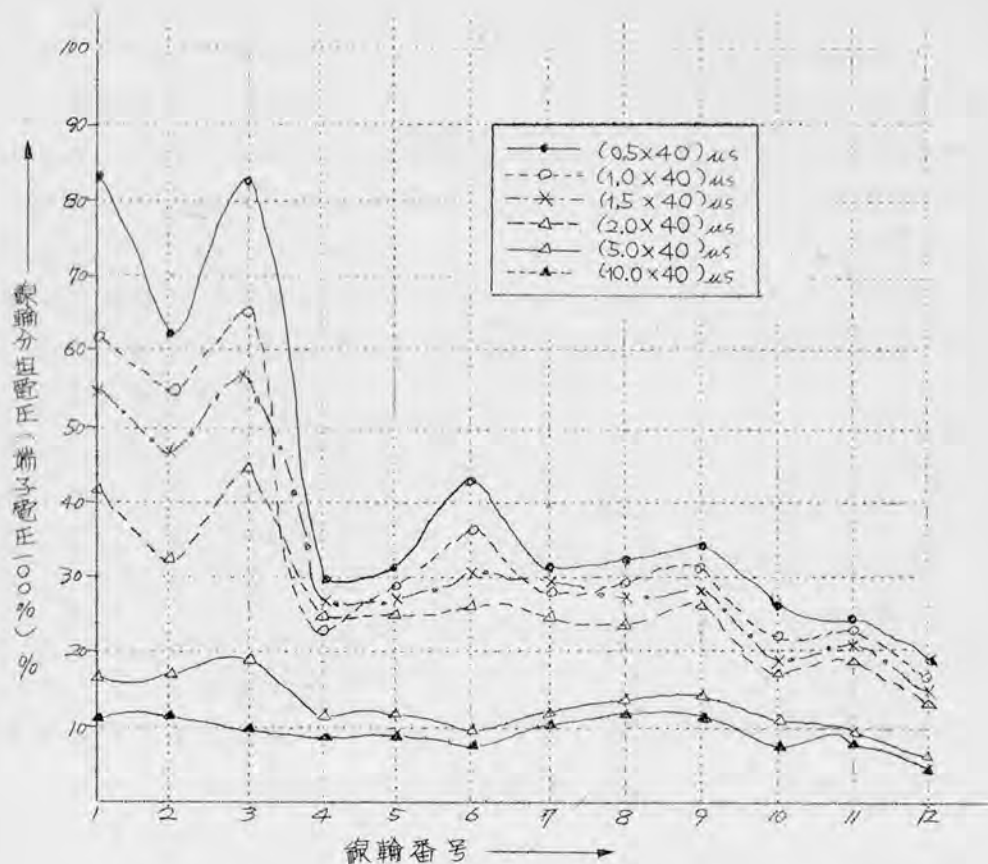
線輪12本を毎極、毎相の薄3, 4極、隔極接巻(第2.14図(a)と同一)した巻線において、終端条件を接地、開放、印加波形として、矩形波、 $(0.5 \times 40)\mu s$ 、 $(1.0 \times 40)\mu s$ 、 $(1.5 \times 40)\mu s$ 、 $(2.0 \times 40)\mu s$ 、 $(5.0 \times 40)\mu s$ 、および $(10.0 \times 40)\mu s$ について線輪の分担電圧を測定した。線輪最大分担電圧曲線と終端接地した場合と第4.14図、開放した場合と第4.15図に示した。



第4.14図 毎極、毎相3薄、4極に対する巻線の線輪分担電圧 (終端接地)

第4.14図および第4.15図の両曲線より次のことを知ることができる。

- (i) 線輪の最大分担電圧は侵入波の波頭長が短い。すなわち、波頭が急峻なる程大きい。また、波頭長が $5\mu s$ 以上になると各線輪の分担電圧は大体等しくなる。むしろ終端線輪が大きくなる。
- (ii) 巻線の始端に近い線輪の最大分担電圧は終端条件の影響を受けない。
- (iii) 線輪分担電圧は始端に近い線輪が大であるが、毎極、毎相3本の線輪が重ね巻になっていると、3本の中各極の真中の線輪の分担電圧は他の二本の線輪に比して小さい。第6.2節に述べた如くこれは真中の線輪の鎖交成束が多いことに起因している。

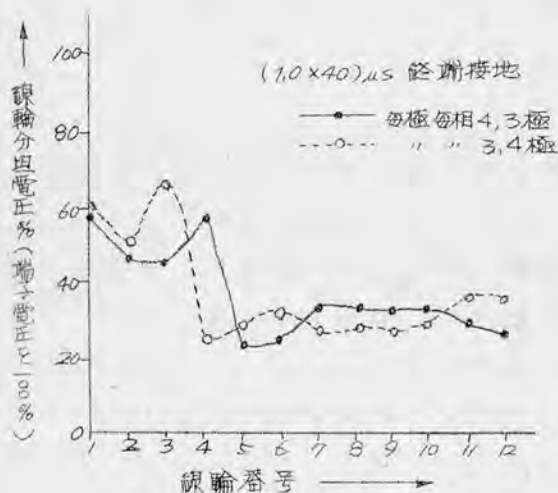


第4.15図 毎極 毎相3線, 4極に対する線間分担電圧(終端開放)

(17) したがって線間の配置により線間の分担電圧は変る。すなわち同相線間間の相互インダクタンスは重ね巻においては無視できない。

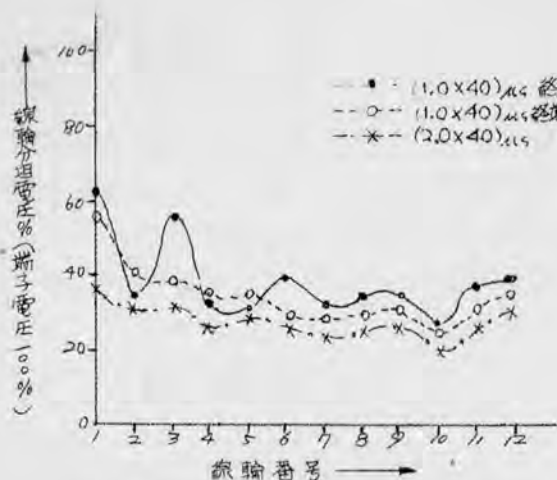
(2) 毎極、毎相の溝数が3と4の比較

同相線間間の相互インダクタンスの効果が線間の分担電圧にどのように



第4.16図

影響するかを確かめるために毎極、毎相の線間数を4本とし、印加波形を $(1.0 \times 40) \mu s$ にて線間分担電圧を測定し、最大線間分担電圧曲線を求めた。前述した毎極、毎相の線間3本の時と比較するため両方の最大線間分担電圧曲線を重いたのが第4.16図である。この両者を比較して、最初の極における各線間の分担電圧が、前述した如く各線間のそれぞれの機交磁束が異なる数の線間、個々の実効インダクタンスに依存する。したがって線間の配置は各線間の分担電圧に影響してくる。



第4.17図 終端を抵抗接地にした時の分担電圧曲線

(3) 終端条件による分担電圧曲線および分担電圧について。

3本と1極とし4極で全節。二層巻に線輪12本を配置し、終端を接地した時と、200Ω抵抗接地した時の巻線の各線輪の最大分担電圧を求めたのが第4.17図である。

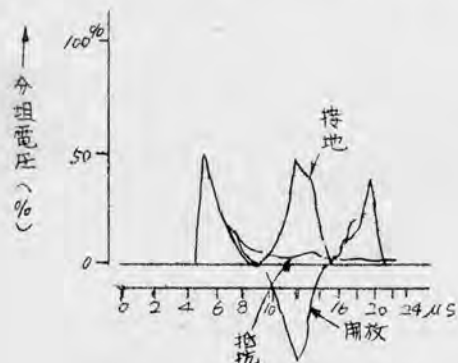
11,000 kVA 発電機(第1.4節参照)の鉄心より取り出した線輪10本を第4.5図の如く直列に接続し、終端を接地、開放および200Ω(波動インピーダンス195Ω)の抵抗接地としたときの(1.0×40)μs(無負荷時の波形)に対する線輪

の分担電圧を実測した。その結果、始端に近い線輪の分担電圧は大きい。

(附録、第4章、第4.1図、第4.2図、第4.3図参照)。なおこの時の始端

より一番目の線輪の最大分担電圧は終端条件に関係しない。第4.18図が終端条件に対する分担電圧のオシログラムである。

この実験より線輪の分担電圧、特に始端より2番目の線輪の分担電圧は線輪の配置、すなわち同様の線輪間の相互インダクタンスの影響があることがわかった。



第4.18図 終端条件による入口線輪の分担電圧

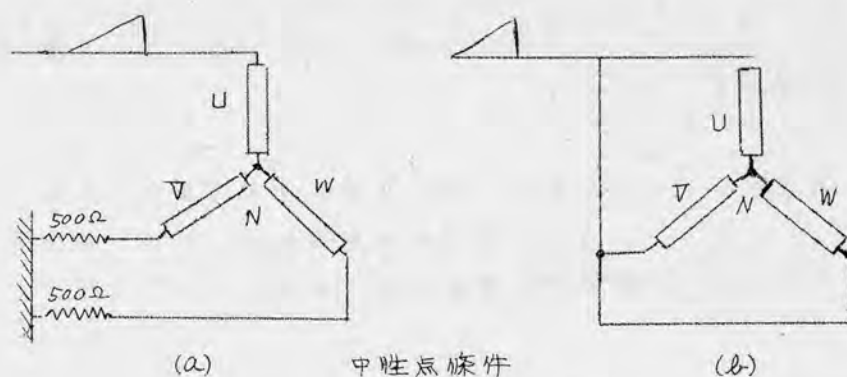
以上実験の結果

1. 線輪分担電圧は侵入波の波頭峻度が高い程、線輪の分担電圧は大きい。特に始端に近い線輪程著しい。
2. 線輪分担電圧は線輪の配置により変ってくる。したがって場合によつては終端条件によつて線輪分担電圧は変ってくる。

§4.4 運転状態における巻線の電位分布

発電機が直配線を有している状態において進行波が発電機巻線を進行する場合の巻線の電位分布を調べてみる。進行波が一相から侵入する場合と三相一括同時侵入とがある。また発電機の中性点の状態は非接地、 60Ω 阻抗接地（現在発電機の中性点阻抗値は接地電流を 100A に抑制するように選定している。中性点阻抗値 R 、発電機電圧を E とすると、接地電流は $I = \frac{E}{\sqrt{3}}/R$ となる）。直接接地（低阻抗接地をも含む、我が国では直接接地は殆んど採用されていない）が採用されているので、印加波が $(1.0 \times 50)\mu\text{s}$ 、 $(10 \times 60)\mu\text{s}$ に対する一相印加、三相一括印加における1相分巻線の電位分布と中性点の状態を変えて実測より求めた。

供試発電機は $4,375\text{kVA}$ 、 12kV 全線輪数120本、二重星形結線の発電機（第1章 1.4節参照）である。測定の際の発電機の巻線結線状態は第4.19図に示す通りで、(a)図は一相に衝撃波が侵入した場合で、線路の波動インピーダンスを 500Ω にとった。(b)図は三相一括同時侵入の場合の回路である。



中性点条件

1. 非 接 地
2. 60Ω 阻抗接地
3. 直接接地

第4.19図

4.4.1 実 測 結 果

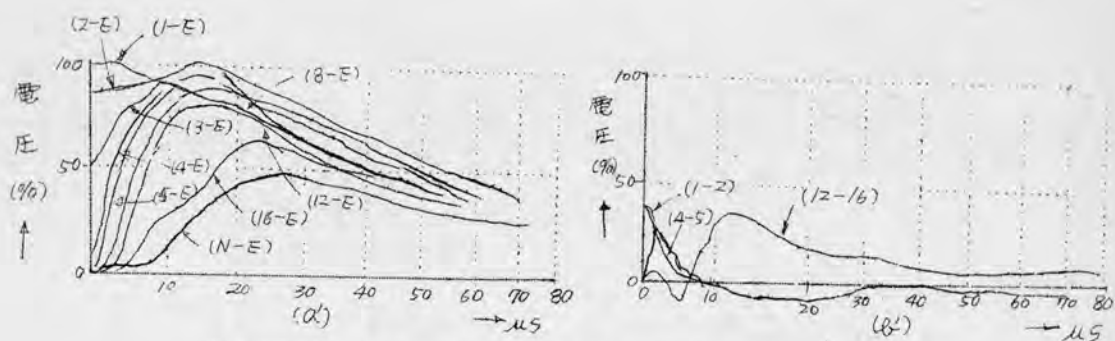
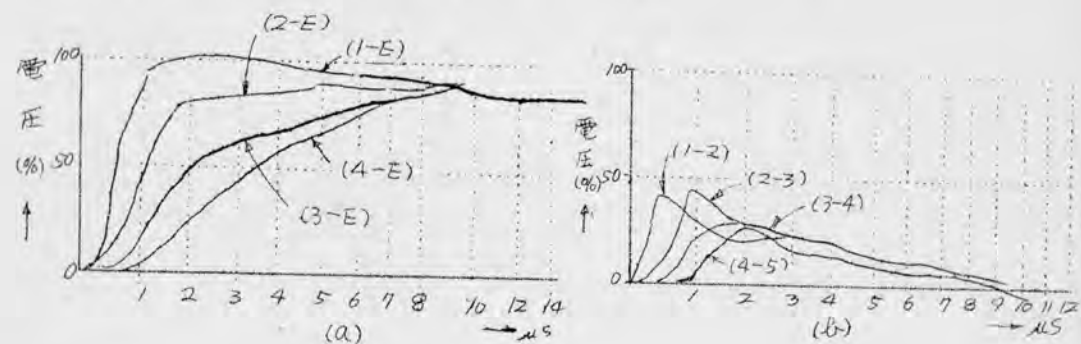
実測した各線路の対地電圧および分担電圧と巻線の端子電圧を100とし、
%を表し、表にしたのが第4.1表である。U相巻線の各線路対地電圧、線路

第4.1表 4375kVA U相巻線の電位分布

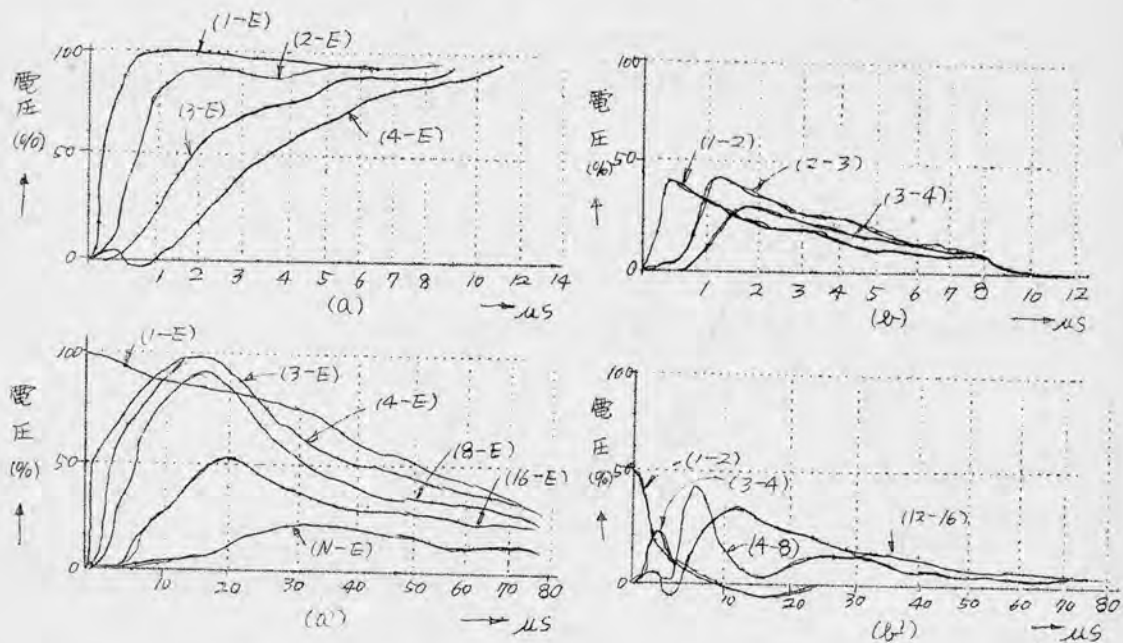
印加 波形 (V, μ s)	印加 相	中性点 の条件	対 地 電 圧 (%)											分 担 電 圧 (%)							
			1-E	2-E	3-E	4-E	5-E	6-E	8-E	12-E	16-E	N	1-2	2-3	3-4	4-5	5-8	8-12	12-16	16-N	
(1.0×50)	U 相	非 接 地	100	100	100	100	99	90	92.5	82	66.5	48	42.8	44.3	33	25.5	—	23	34	27	
		60 Ω	"	99	99	98	—	—	91.5	75.5	46	17.5	42.2	42.4	31.6	—	28	24	33	40	
		直接接地	"	"	"	97	—	96	—	85.5	70	—	42.8	46.5	34	—	—	—	25	—	
	三相一括	非 接 地	"	95	104	109	116	—	132	—	150	157	43	42.8	23.3	14.3	—	32	34	23	
		60 Ω	"	92	92	85.5	—	—	79.5	79.5	77.5	36.5	39	42.5	24.8	—	49.5	32.5	32	32	
		直接接地	"	89.5	"	89.5	—	—	76.5	62.5	54.5	—	41	"	"	—	53	36.5	32	55	
(10×60)	三相一括	非 接 地	"	102	116	125	—	—	137	149	—	162	16.6	16.6	—	—	31	—	21	12.5	
		60 Ω	"	98	96.5	93	—	—	89	—	67.5	33	14.5	16.0	—	—	33	—	—	37.5	
		直接接地	"	96	94	94	—	—	81	—	52	—	14.1	14.6	—	—	"	—	—	—	
	U 相	非 接 地	"	106	104	104	—	—	96	—	65.5	46	15.4	17.3	—	—	27	—	—	27	
		60 Ω	"	98	100	100	—	—	75	—	62.5	15	15	15	—	—	31	—	—	35	
		直接接地	"	100	102	—	—	—	95.5	—	44	—	16	16	—	—	32	—	—	—	

- 註. 1. 各電圧は印加端子の対地電圧を100として%で表示した。
 2. 1-E, 2-E,は印加端子より1番目の線路の対地電圧。以下同様
 3. 1-2, 2-3,は印加端子より1番目, 2番目, 3番目,線路の端子間。即ち線路とあらわす。
 4. N: 中性点をあらわす。

の分担電圧の波形を示すと、第4.20図より第4.31図である。これらのオシロ
 グラムのうち(1.0×50) μ s波形の場合は波頭長が短いので、波頭部の波形がよ
 くわかるようにブラウン管の掃引速度が速い場合についても図示しておいた。



第4.20图 (1.0x50) μs U相切加 N-500 Ω接地 他相端子500 Ω接地



第4.21图 (1.0x50) μs U相切加 N-60 Ω接地 他相端子500 Ω接地

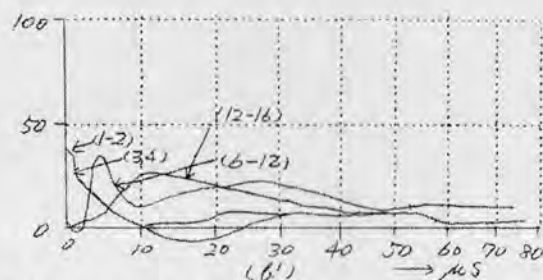
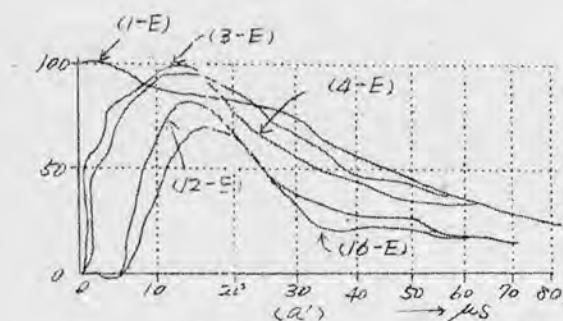
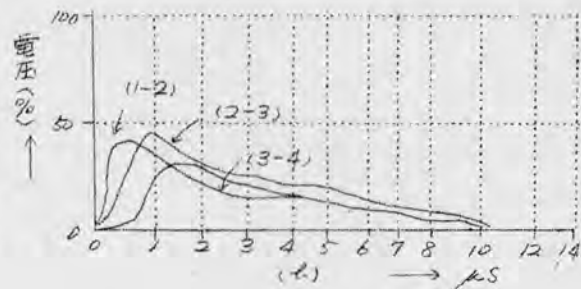
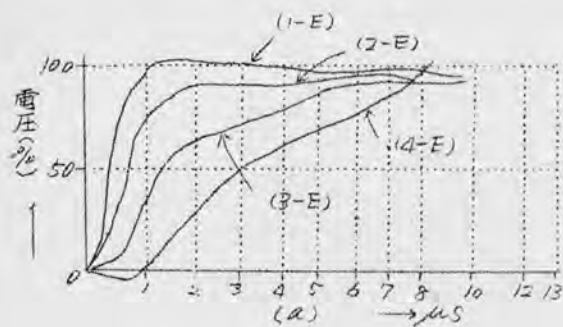


图 4.22 (1.0x50) μ S U 相印加 N-E 他相 500 Ω 接地

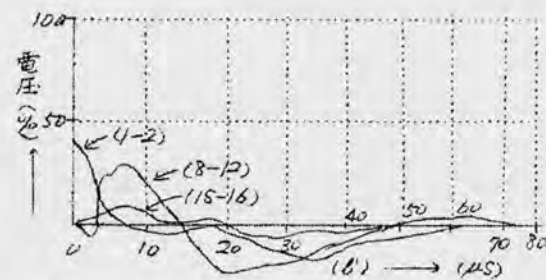
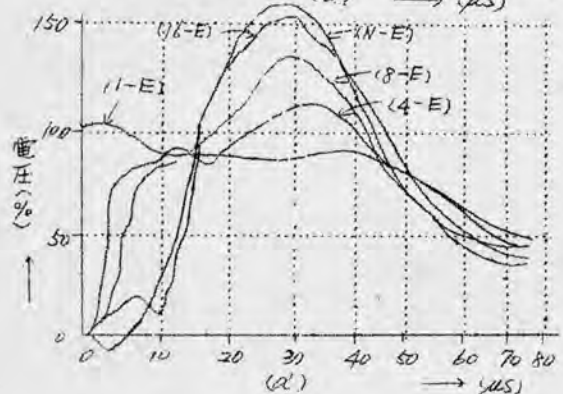
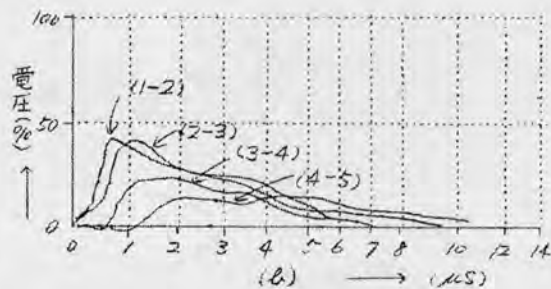
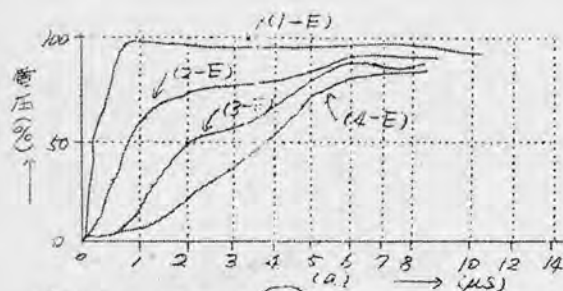


图 4.23 (1.0x50) μ S 三相一括印加 N- 開放

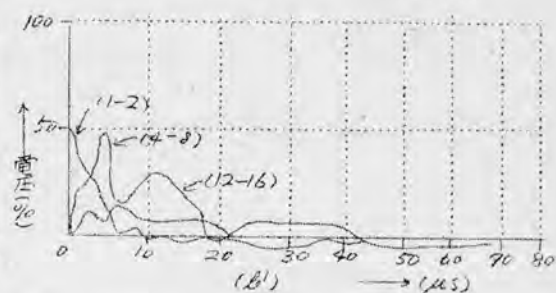
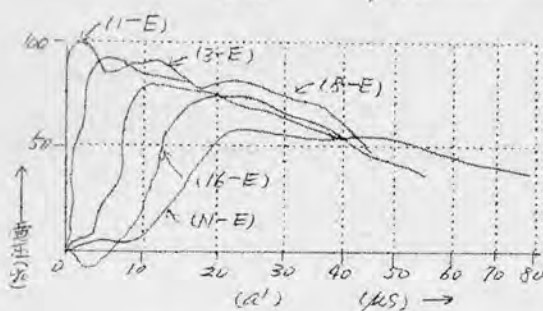
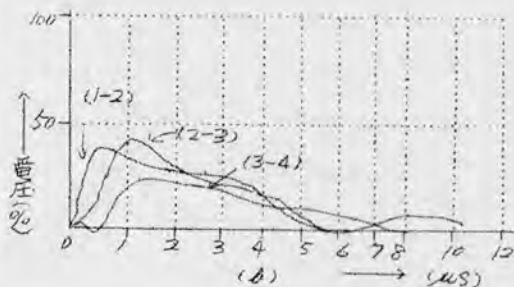
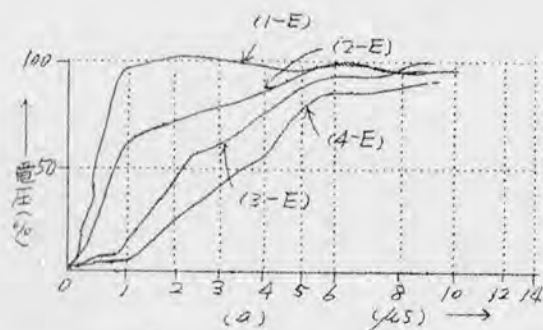


图 4.24 图 $(1.0 \times 50) \mu s$ 三相—括印加 $N-60 \Omega$

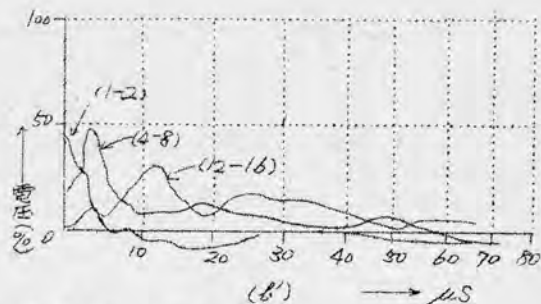
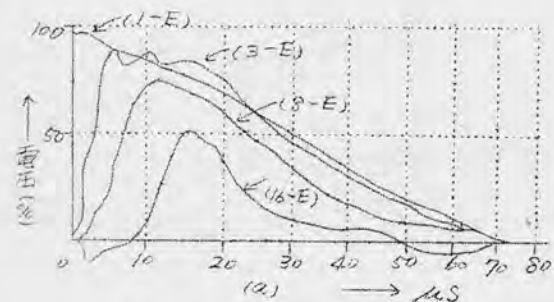
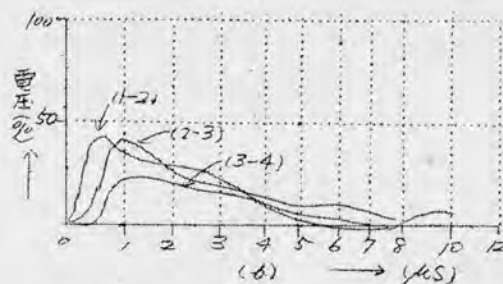
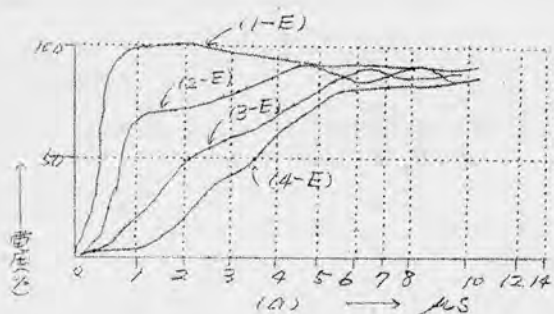


图 4.25 图 $(1.0 \times 50) \mu s$ 三相—括印加 $N-E$

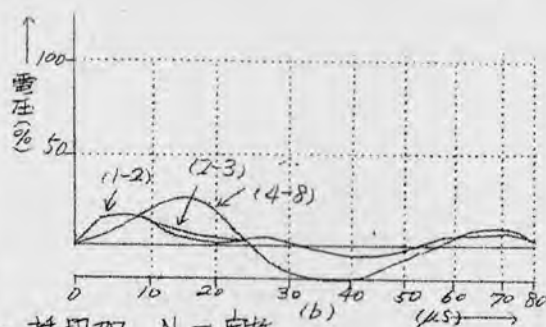
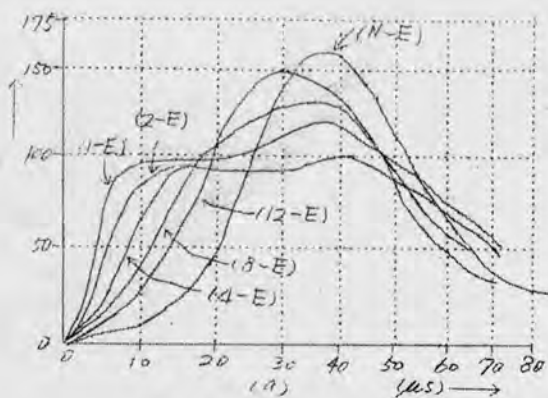


图 4.26 图 $(10 \times 60) \mu S$ 三相—括印加 N—屏蔽

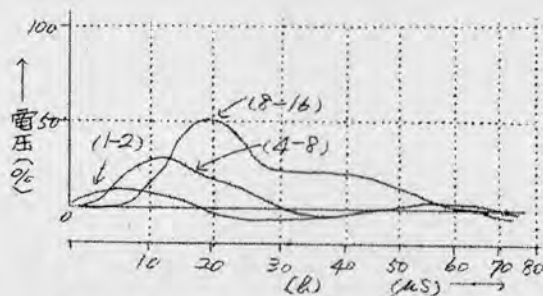
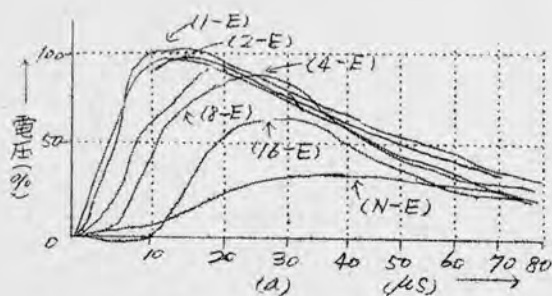


图 4.27 图 $(10 \times 60) \mu S$ 三相—括印加 N— 60Ω 接地

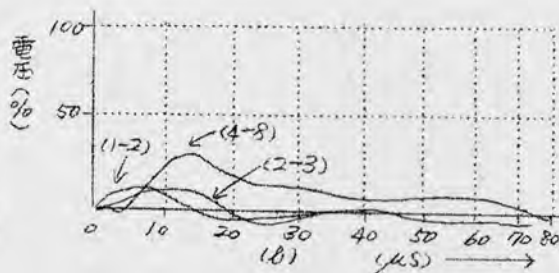
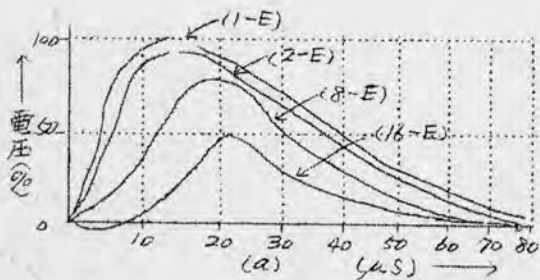


图 4.28 图 $(10 \times 60) \mu S$ 三相—括印加 N-E

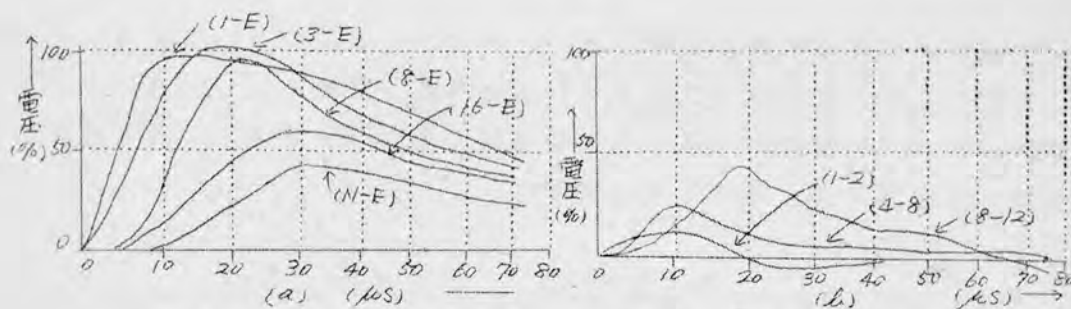


图 4.29 图 $(10 \times 60) \mu s$ U 相印加 N - 开放
他相端子 500Ω 接地

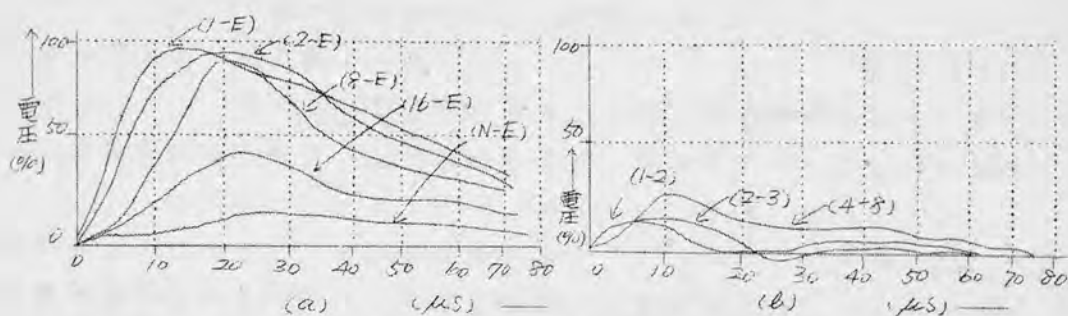


图 4.30 图 $(10 \times 60) \mu s$ U 相印加 N - 60Ω 接地
他相端子 500Ω 接地

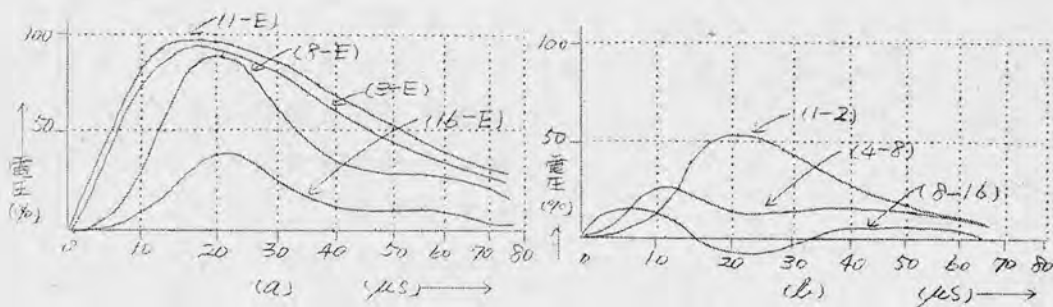


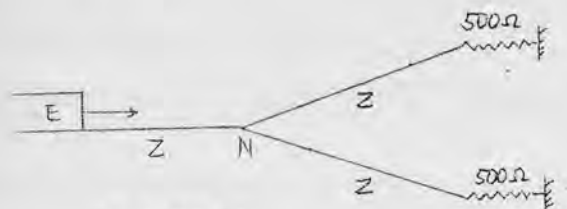
图 4.31 图 $(10 \times 60) \mu s$ U 相印加 N - E
他相端子 500Ω 接地

4.4.2 考 察

4.4.1項の実測結果に考察を加えると次の通りである。

1 印加波形 $(10 \times 50) \mu s$ に対する線路の分担電圧の最大は巻線端子の1番目において生じ、その値は42%である。印加波形 $(10 \times 60) \mu s$ に対しては16%である。したがって分担電圧は前節で述べた如く侵入波の波頭峻度により決まる。

2 1相印加の場合中性点の電圧は $(10 \times 50) \mu s$ においては48%, $(10 \times 60) \mu s$ においては46%になっている。1相分巻線を波動インピーダンスZをもった線路と考え、1相印加の場合の等価回路を表わすとヤ4.32図の通りとなる。入来波を矩形波とした時のN点の電圧は



ヤ4.32図

$$E_N = \frac{2}{3} E \quad \text{----- (4.37)}$$

となる。

しかるに、実測値では始端電圧の波高値の1/2になっている。その理由次の通りである。

ヤ4.1表において三相一括して印

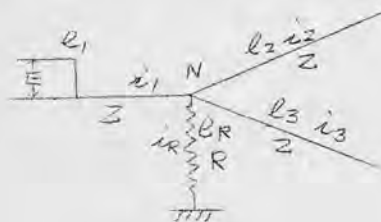
加した時の中性点電圧状態における中性点電圧は157%、162%であるので減衰係数は20%と考える。減衰係数を見込んだ時の中性点電圧 E_N は

$$E_N = \frac{16}{3} E \quad \text{----- (4.38)}$$

となる。したがって減衰による中性点電圧の低下が主なるものと考えられる。

3 中性点を60Ωの抵抗を通して接地した時一相印加の時の中性点電圧は印加波形 $(10 \times 50) \mu s$ において175%, $(10 \times 60) \mu s$ においては15%である。この場合の理由について解説する。

一相印加、中性点60Ω接地、他の二相の巻線は500Ωを通して接地して11。その時の中性点Nの電圧を求めてみる。進行波 e_1 , e_2 点における反射波 e_1'



ヤ4.33図

二相巻線への透過波をそれぞれ e_2 , e_3 60Ω抵抗への透過波を e_R とし、これらに対する各電流波をそれぞれ i_1 , i_1' , i_2 , i_3 および i_R とする

$$e_1 + e_1' = e_2 = e_3 = e_R$$

$$i_1 - i_1' = i_2 + i_3 + i_R$$

したがって

$$\frac{e_1}{Z} - \frac{e_1'}{Z} = \frac{e_2}{Z} + \frac{e_3}{Z} + \frac{e_R}{R} = \left(\frac{2}{Z} + \frac{1}{R} \right) (e_1 + e_1')$$

$$e_1' = - \frac{R+Z}{3R+Z} e_1$$

$$e_R = \frac{2R}{3R+Z} e_1$$

----- (4.39)

したがってN点の電圧 E_N 、侵入波の波高値を E とすると(4.39)式より

$$E_N = \frac{2R}{3R+Z} E \quad (4.40)$$

(4.40)式の $R=60\Omega$ $Z=400\Omega$ (附録オ3章 表3.1表参照)

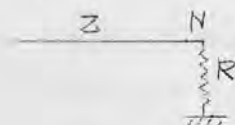
$$E_N = 0.207 E$$

減衰係数20%を考えると 中性点電圧 E_N は

$$E_N = 0.166 E$$

となり、オ4.1表の中性点電圧 17.5%, 15%と大体一致する。

4. 三相一括印加した時、中性点を60 Ω 、抵抗接地における中性点電圧 E_N を求めてみる。



オ4.34図

等価回路はオ4.34図に示す通りで、 Z は三相一括した時の巻線の波動インピーダンス R は中性点抵抗値とする。侵入波の波高値を E 、中性点の電圧 E_N 減衰係数を ρ とすると

$$E_N = \frac{2R}{Z+R} (1-\rho) E \quad (4.41)$$

(4.41)式に $Z=96\Omega$ (附録オ3章 表3.1表 参照), $R=60\Omega$, $\rho=0.2$ を代入すると

$$E_N = 0.615 E$$

オ4.1表における $(10 \times 50)\mu s$ を印加した時の中性点電圧 56.5%に大体一致する。

5. 三相一括して印加した時 中性点を開放状態における中性点電圧はオ4.1表より $(10 \times 50)\mu s$ を印加した時は端子電圧の157%, $(10.0 \times 60)\mu s$ の時は162%である。減衰がない時は中性点において全反射となり、入来波の波高値を E とすると中性点電圧は $2E$ となる。

減衰係数 ρ を入れると、中性点電圧 e は次式となる。

$$e = 2E(1-\rho) \quad (4.42)$$

$e=1.6E$ として(4.42)式より巻線の始端より終端迄の減衰係数 ρ を求めると

$$\rho = 0.2$$

となる。

したがって中性点を開放した状態における中性点電圧は減衰のため巻線の端子電圧の2倍より小さい。

(6) 侵入波の波頭峻度が急峻な場合は鉄心の表皮効果のため波頭の歪歪が著しい(オ4.20図～オ4.26図参照)

5.4.5 発電機巻線の対地電圧分布

オ4.3節においては線輪導線部に錫箔或はアルミニウム箔を貼りつけて、面

別接続あるいは重ね巻に線輪を配置した巻線における線輪対地電圧を求め、オ
4.4節では直配線を有しているとの想定のもとに発電機巻線の電位分布、中性点
の電圧について実測結果から説明した。発電機の線輪は鉄心溝に納り、したがっ
て鉄心の表皮効果二層巻巻線では他相の線輪と同一溝に納り、また他相線輪と
歯を隔てているので、同相線輪のみでなく、他相線輪との間に相互誘導がある。
さらに回転子磁極の鉄心のため実効インダクタンスの増加および鉄心の表皮効
果がある。本節において巻線の対地電圧に対する鉄心の影響と、各相巻線又は
分岐巻線の平衡状態とを調べてみる。

4.5.1 回転子磁極による固定子巻線の電圧分布への影響

(1) 1000 ｋVA (11 ｋV) 発電機における実測結果

供試相はU相で、他の二相は開放状態において線輪の対地電圧を測定した。
印加波形は回転子がある時が $(1.2 \times 38) \mu s$ 、取り除いた時の状態では
 $(1.2 \times 40) \mu s$ であった。なおU相巻線はオ3重オ3巻目に示した如く、回
転子磁極と対峙して位置している。巻線の線輪対地電圧はオ4.35図に示した。
回転子磁極の影響は殆んどない。

(2) 1500 ｋVA (6.6 ｋV、単層、鎖形巻線)

供試相はU相巻線、印加波形は $(1.2 \times 43) \mu s$ である。巻線の線輪対地電
圧はオ4.35図に示した。その結果、U相分岐巻線24本中始端に近い9番目の
線輪および終端に近い21番目より24番目の線輪では回転子の影響は余り
ないが、巻線の中程の線輪の対地電圧は回転子がない場合の方が低くなっている。
15番目の線輪では回転子がある時の対地電圧は96%、回転子がない時は
82%である。

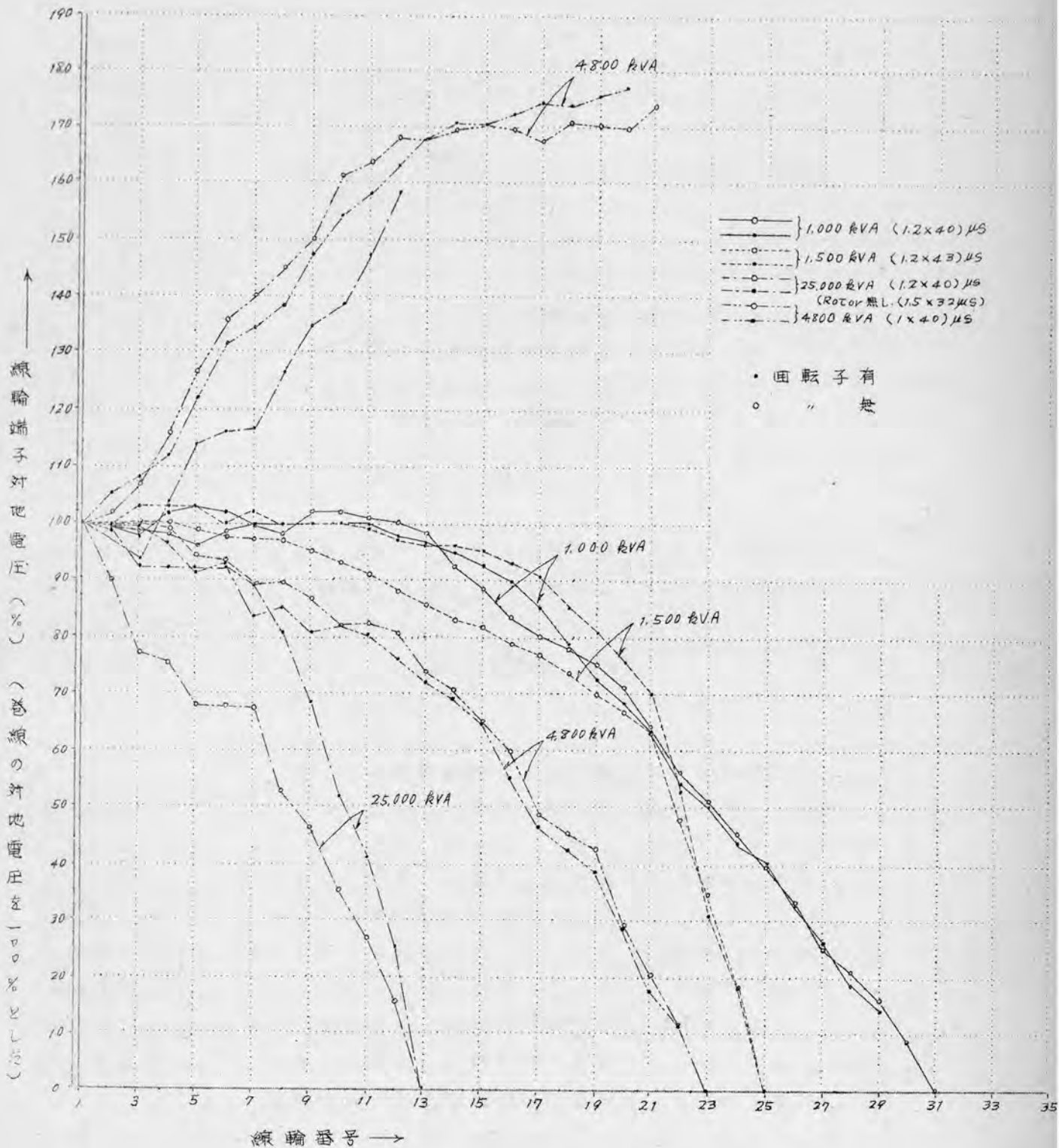
(3) 2500 ｋVA (11 ｋV、二層、重ね巻、4重星形結線)

供試相はU相の3番目の分岐巻線(オ1.22図参照)である。分岐巻線の線
輪対地電圧はオ4.35図に示した。回転子がある場合の印加波形は $(1.2 \times 40) \mu s$ 、
回転子を取り除いた場合の印加波形は $(1.5 \times 32) \mu s$ である。オ4.35
図の曲線からは回転子がない時の巻線中の線輪対地電圧は回転子がある時の対
地電圧より低い。これは回転子がないことにもよるが、印加波の波頭が緩やか
になっていくことと、波尾長が幾分短いことにもある。したがって回転子磁極
による巻線の線輪対地電圧に与える影響は少い。

(4) 4800 ｋVA (6.6 ｋV、二重星形結線)

供試相はU相である。回転子磁極の位置は不明である。回転子がある場合と
ない場合の巻線の線輪対地電圧はオ4.35図に示す。測定は終端を開放した時
と接地した時とを行った。

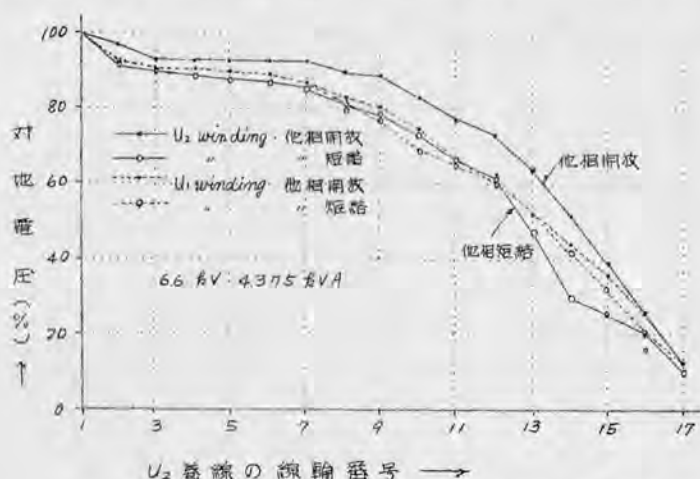
以上回転子磁極による巻線の対地電圧を実測より求めた結果、回転子の磁極
と対峙している巻線の対地電圧は回転子がない時より、オ4.35図に示した如
く、始端の対地電圧の約10%程高いものもあるが、回転子の有無に拘られ
余り変らぬものもある。



第 4.35 図

4.5.2. 他相巻線を開放、短絡した時の巻線の対地電圧

発電機の巻線の対地電圧が他相巻線の状態によつて異なることが考えられる。



第4.36回 他相巻線を開放した時と短絡した時の巻線の対地電圧 (線路最大対地電圧)

すなわち、各相巻線間の相互インダクタンス、誘導係数が効いているからである。

第4.36回は6.6kV、4,375kVA発電機において実測した線路の最大対地電圧を、始端の電圧100%として巻線の線路番号により求めた曲線である。印加波は(1.0×40)

μsである。当該発電機は第1.4節において求めておいた二重星形結線である。第4.36回の曲線より、

(i) 他相巻線を開放した時と短絡した時とでは、巻線の対地電圧は開放した時の方が幾分大きい。U2巻線では12番目の線路で、始端電圧の約10%大きい。U1巻線は殆んど変らぬ。他相を開放した時の方が線路対地電圧は大きい。

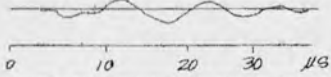
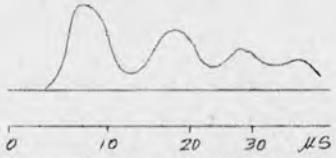

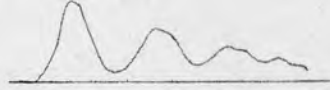

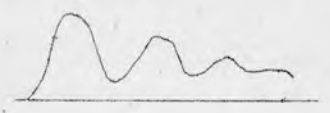
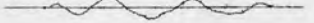
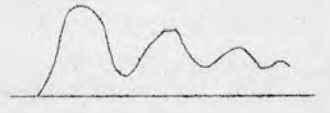

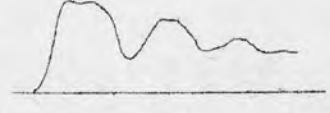

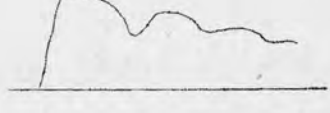


(ii) また同相巻線においても二つの分岐巻線の対地電圧は異なっているのがわかる。

4.5.3. 各相巻線間の対地電圧および接地電流の不均衡

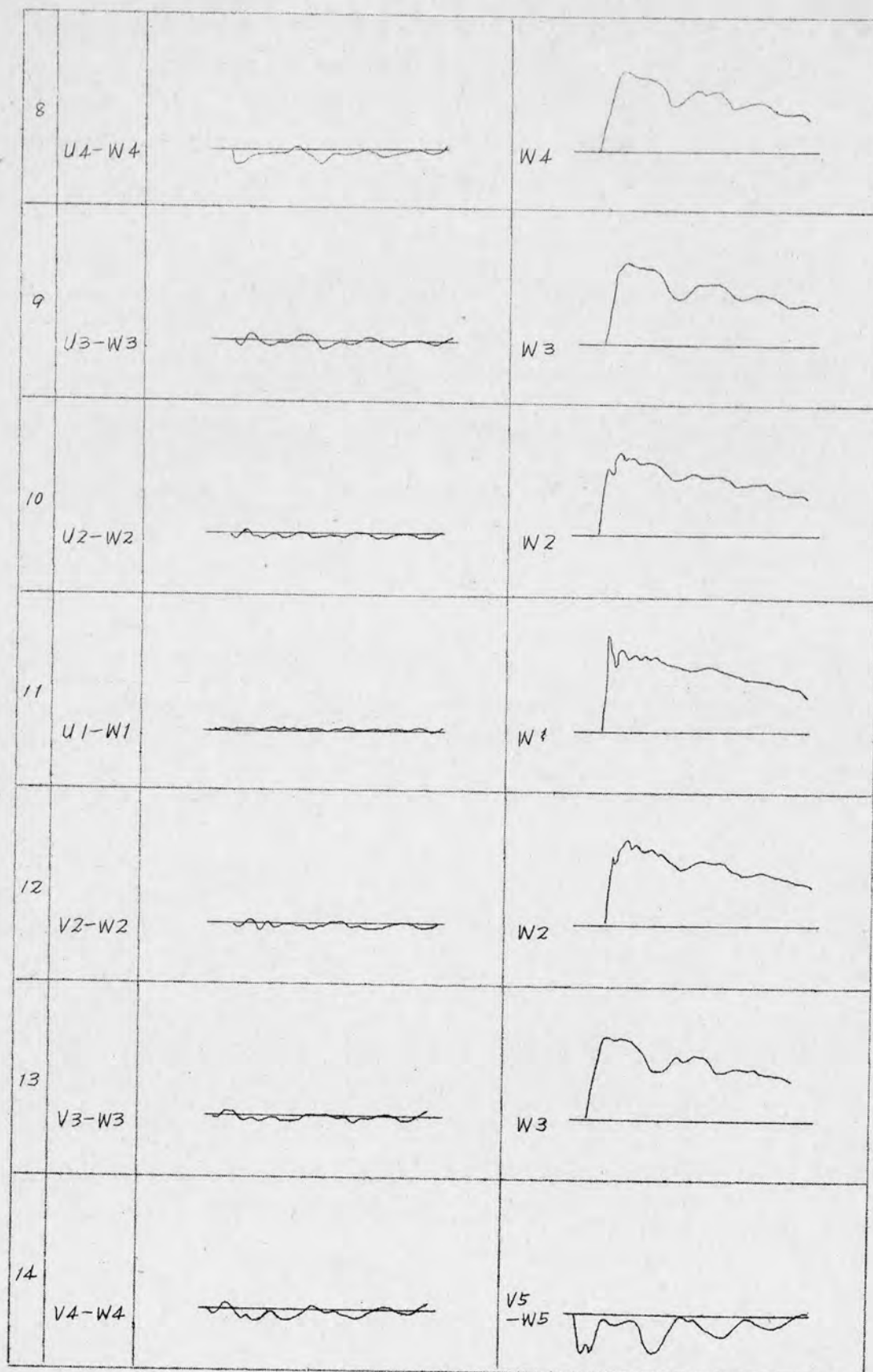
発電機の各相の巻線は、Lが全く同一に分布されていないので、各相巻線の線路対地電圧は各相とも同一ではない。細かく述べる、始端(出力端子)から、最初の線路迄の導線の長さの違い、最初の線路が溝内の上コイルであるか、下コイルであるか、その線路が例えば毎極、毎相3の溝を有する時左右の線路のどの線路に入るか、さらに、各極間の渡り線配置から来る同相、或いは他相との相互インダクタンスがそれぞれ違ってくる。これらの巻線のR、L、C等の定数より各巻線の対地電圧波形を厳密に求めることは不可能である。400kVA発電機各相巻線の対地電圧を測定して各相の線路対地電圧の相違を調べた。各相巻線の対地電圧波形は附録第4.4回に示しておいた。第6章において述べる電圧平衡法を用いて各相間の対地電圧の不均衡を測定したのが第4.37回である。

さらに、400kVAの各相巻線の終端に82Ωを挿入して各相の接地電流の差を測定した。その結果が第4.38回である。

第437回 電圧の不平等

試番	測定タップ	巻線間の電圧不平衡	対地電圧波形
1	U_9-V_9		V_9 
2	U_9-V_{10}		V_{10} 
3	U_9-V_8		V_8 
4	U_7-V_7		V_7 
5	U_5-V_5		V_5 
6	U_3-V_3		V_3 
7	U_2-V_2		V_2 

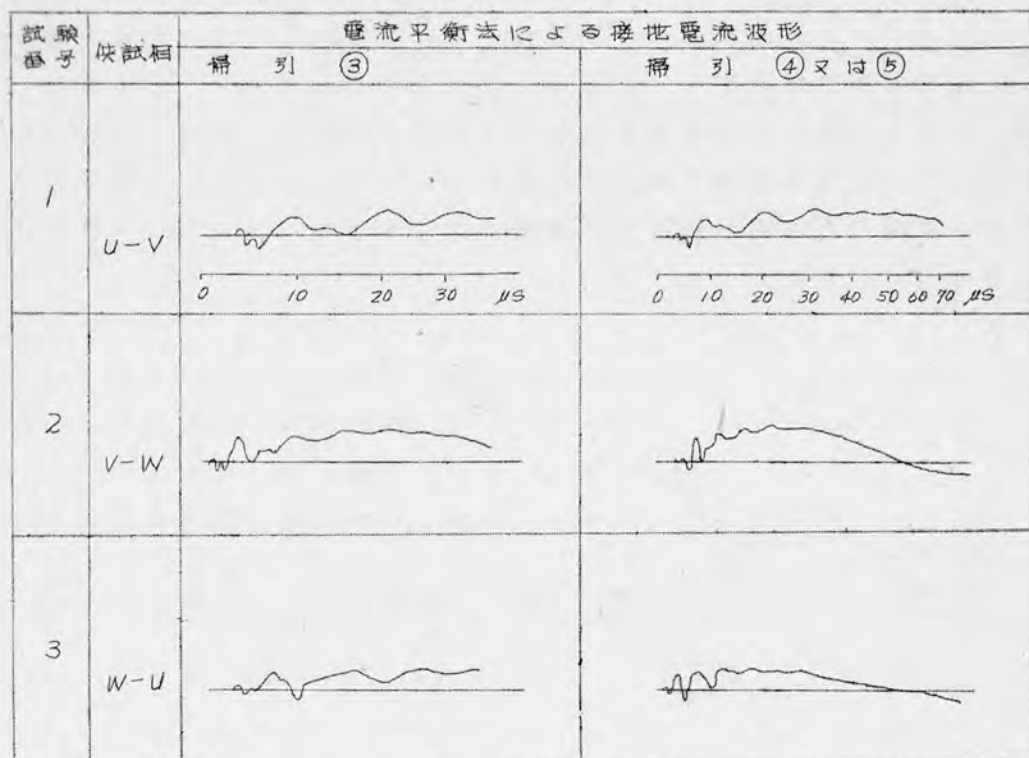
7
第4.3~~5~~ (その2) 電圧の不平衡



以上、各相巻線間の対地電圧の不均衡および各相巻線の接地電流の差を実測した結果、各相巻線間に不均衡があることがわかった。この不均衡は第6章における巻回間の短絡の検出に平衡法を適用する場合の障害となる。

これら不均衡の振巾は、測定用の分圧器を適当に調整することにより、ある程度減少せしめることができるが、位相のずれに対しては、これを簡単に調整することはできない。したがって、これら不均衡は巻線間の不均衡にあるので、根本的にこの不均衡を調整することはできない。

第438図 接地電流の不均衡

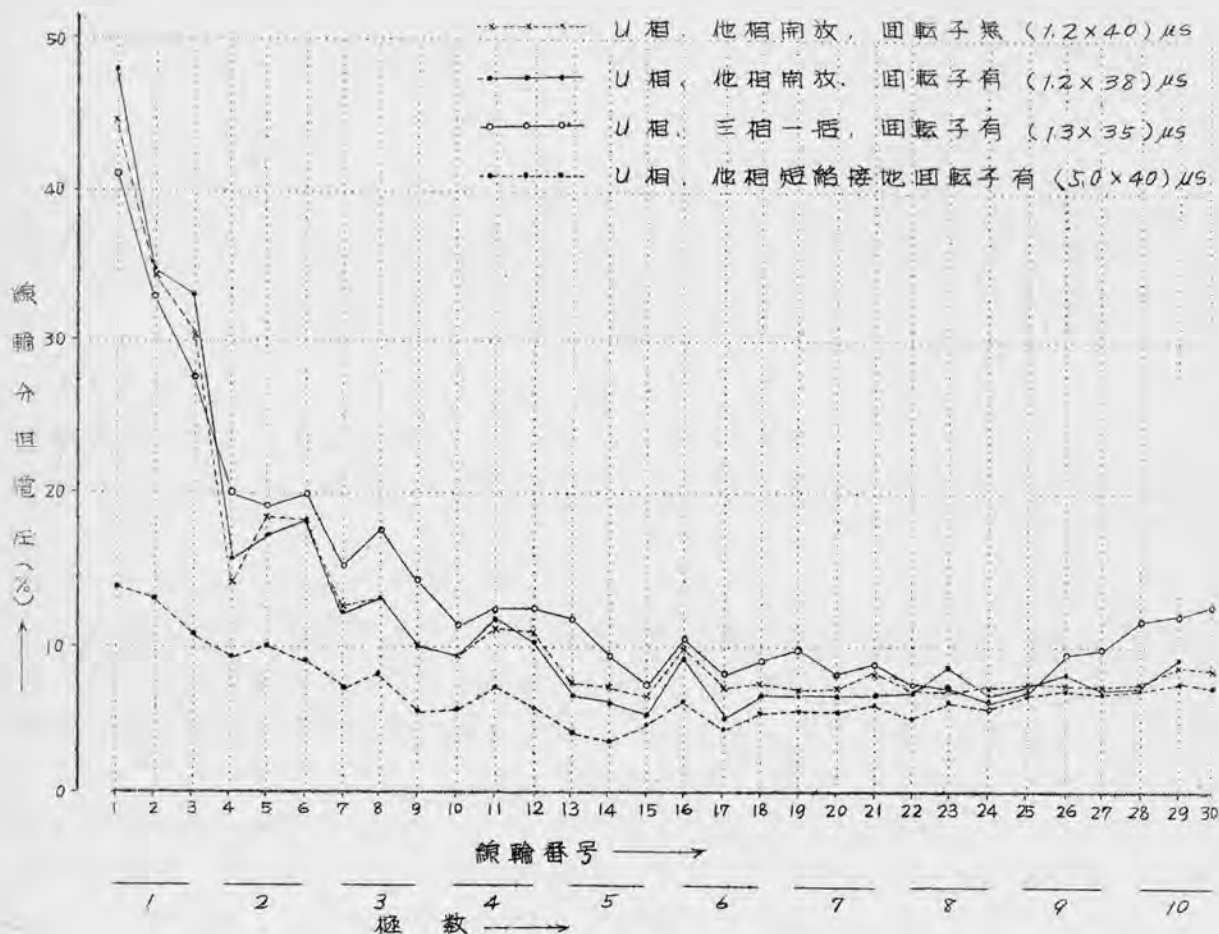


3.4.6 発電機巻線の線輪分担電圧

発電機巻線の線輪分担電圧は理論的には第4.2節、実験的には第4.3節で述べ、第4.4節においては発電機を使用状態における線輪分担電圧について実測結果より述べておいた。したがって本節では回転子の影響および線輪の分担電圧と巻回間分担電圧との関係を述べ、巻線の巻回間最大分担電圧と波頭長の曲線を説明する。

4.6.1. 回転子の分担電圧への影響

回転子がある場合とない場合の巻線中の線輪分担電圧を測定した。11kV 1,000kVA発電機のU相巻線について実測し、その線輪の最大分担電圧を始端の対地電圧を100%として求めたのが第4.39図である。U相巻線の回転子磁極との関係位置は第3.6図に示す如く、磁極と対応しているが分担電圧に対する回転子磁極の影響は大したことはない。回転子がある場合の方が巻線の出カ端子側に近い線輪では回転子がない場合より幾分大きい。(第4.39図参照)

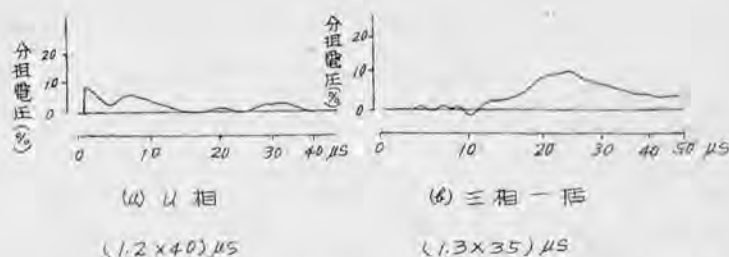


第 4.39 図

11kV, 1,000kVA発電機の巻線の線輪分担電圧で注目されるのは始端(出カ端子)より16番目の線輪分担電圧が、U相巻線に印加の場合に

において、その波頭が急峻であるが、三相一括の場合はその急峻さがない。これらのオリシログラムは第440図に示しておいた。

一相より急峻なサージが侵入した時には16番目の線輪巻回間には、極めて高い電圧がかかることが考えられる。実測した結果では印加波 $(1.2 \times 40) \mu s$ の時巻線の始端電圧



第440図 1相16番目の線輪の分担電圧

の9.5%が16番目の線輪の最初の巻回間にかかることになる。

次に4800kVA発電機W相巻線に印加した時、三相一括して印加した時、三相一括して印加した時のW相巻線の線輪分担電圧を測定し、最大線輪分担電圧を始端電圧を100%として巻線の線輪の最大分担電圧を求めたのが第441図および第442図である。

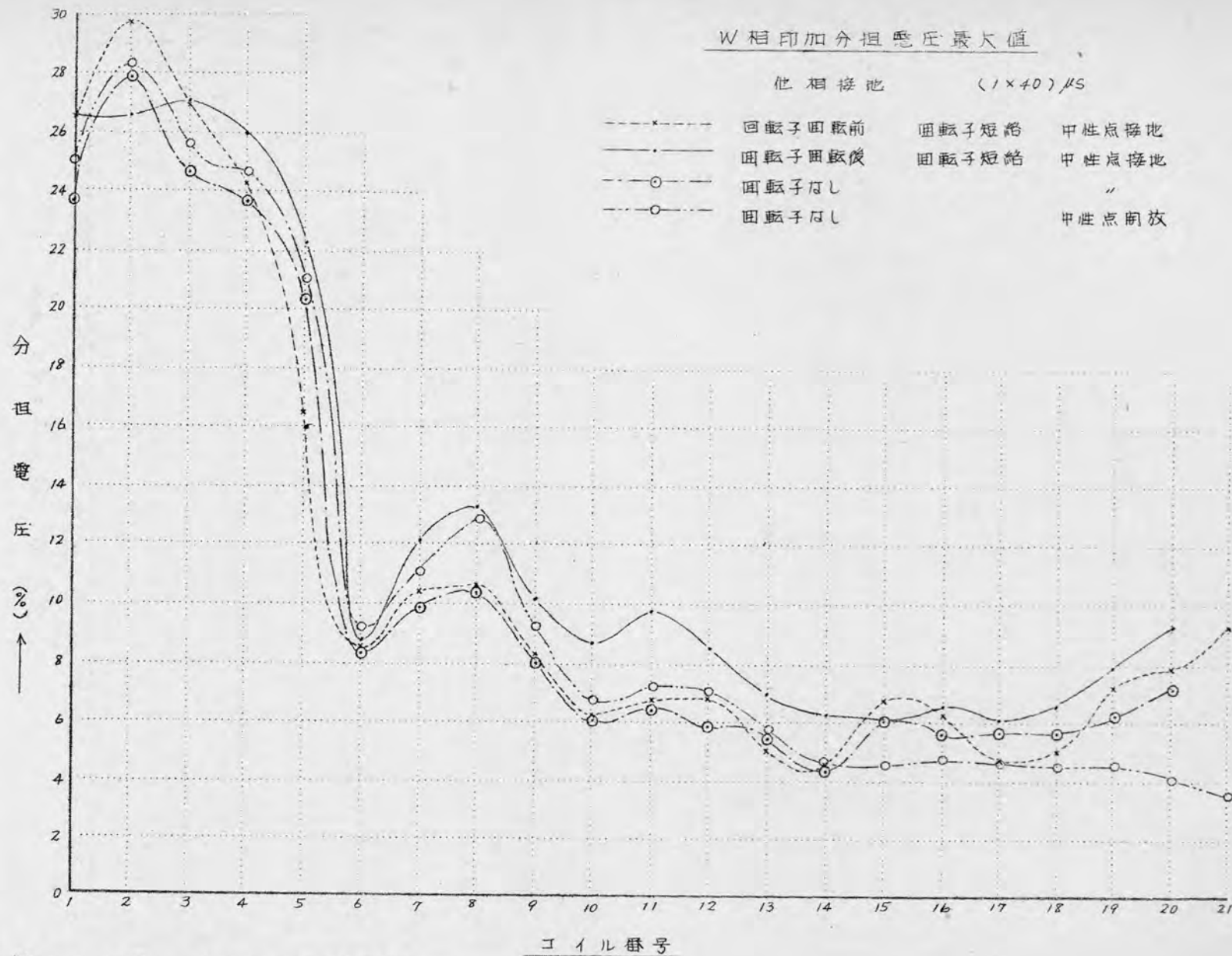
第441図に示した如く、回転子を電気角度でただけ回転して、回転前と回転後と、さらに回転子がない場合の線輪分担電圧を測定した。その結果、回転子の分担電圧に与える影響はある程度認められる。

4.6.2 印加波の波頭長と分担電圧

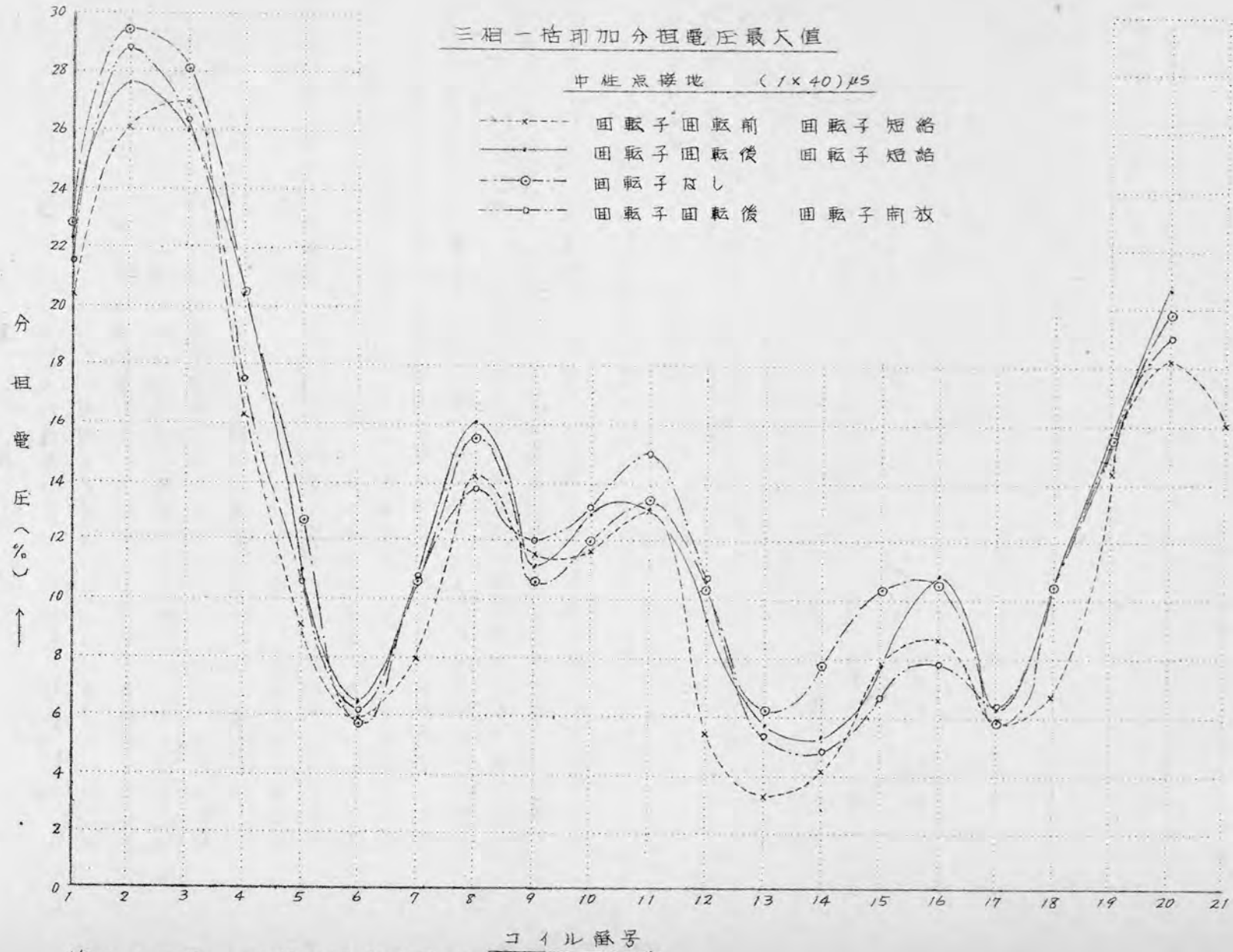
巻線中の線輪の分担電圧が印加波の波頭長によつて変ることば、第432項において述べた通りであるが、筆者が実測したデータ、さらには委員会⁽²⁰⁾の資料から巻回間の最大分担電圧と波頭長との関係について求めてみる。

まず線輪の巻回間分担電圧と線輪の分担電圧との関係について15000kVA発電機にて実測した。印加波は大体標準波形である。その結果は第443図に示した。この実測結果から各巻回間分担電圧は等しいので、線輪内の巻回間分担電圧は線輪の最大分担電圧を線輪の巻回数で割つたものであることがわかる。

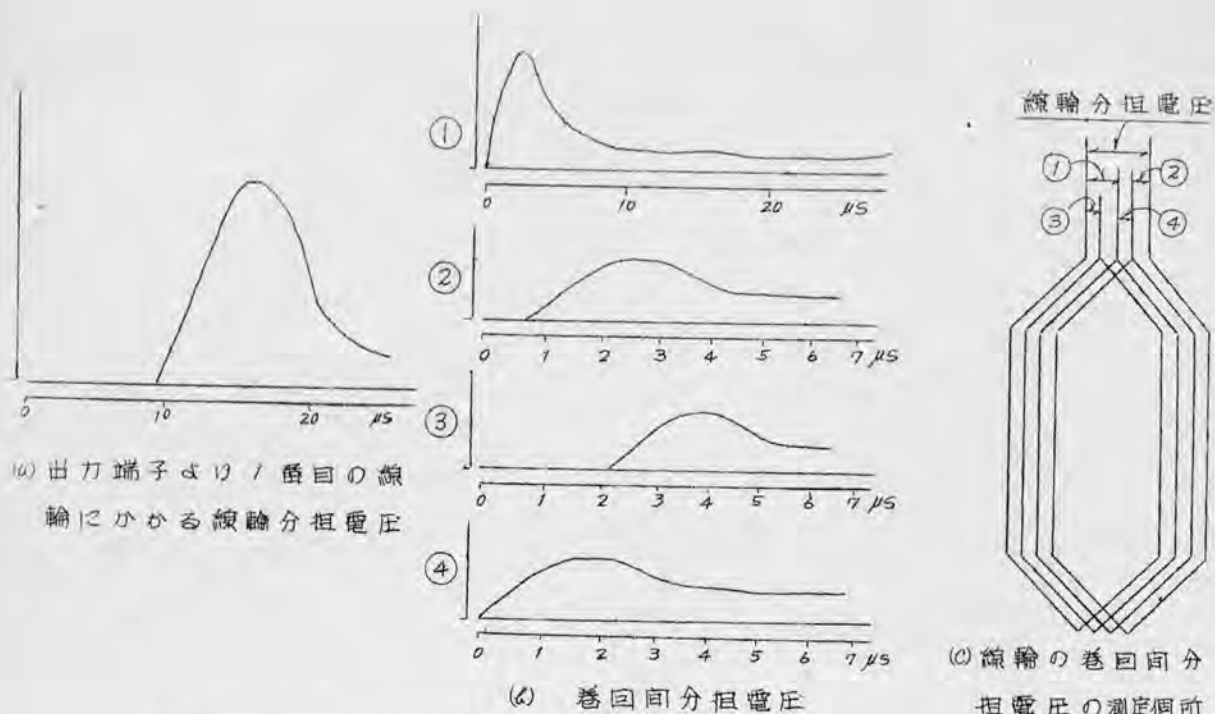
線輪の分担電圧と巻回間分担電圧との関係を単独線輪について実測した結果⁽²¹⁾ 最初の巻回間の分担電圧は線輪分担電圧を巻回数で除した値の約1.2〜1.3倍であることが報告されている。単独線輪の場合と発電機におさめられている状態とにおいては、相互インダクタンスの作用の分布が異なり、発電機に納められている場合の方が巻回間の実効インダクタンスは等しいと考えられるので、巻回間の分担電圧は大体等しい。すなわち線輪の巻回間分担電圧は線輪にかかる分担電圧を線輪の巻回数で除した値と考える。筆者は関西電力、日立製作所と協同で御岳発電所発電機の線輪分担電圧を測定したが、その結果においても巻回間分担電圧は線輪分担電圧を巻回数で除した値である。また東京電力、日立製作所と協同して水内発電所17000kVA発電機について測定した結果も同様な結果がえられている。



第 4.4 1 図 4,800 kVA 分担电压



第 4.4 2 図 三相一括分担電圧



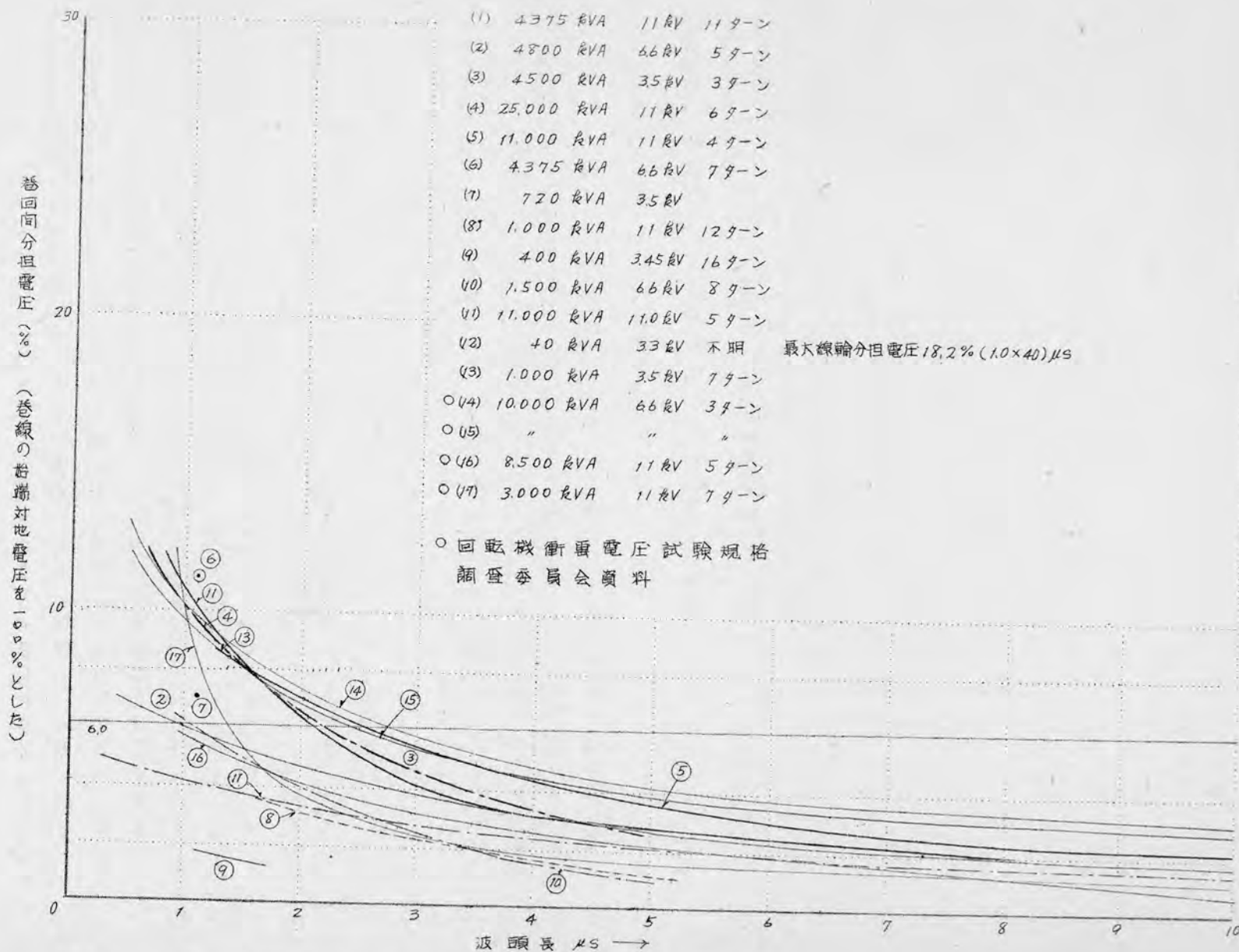
第4.43図 11,000 V, 15,000 kVA の巻回間分担電圧

発電機巻線の最大巻回間分担電圧と印加波の波頭長との関係を求めた曲線が第4.44図である。1ヶ台の発電機について実測した線輪の最大分担電圧を巻回数で割った値を最大巻回間分担電圧とした。

第4.44図の曲線から水車発電機の巻回間の分担電圧は波頭が急峻な程大きく、波頭長が $5\mu s$ より大きい場合は巻回間の分担電圧は始端電圧の5%以下と考えられる。また波頭長が $10\mu s$ 位になると巻回間分担電圧は波頭長に対して減少の割合は極めて少い。

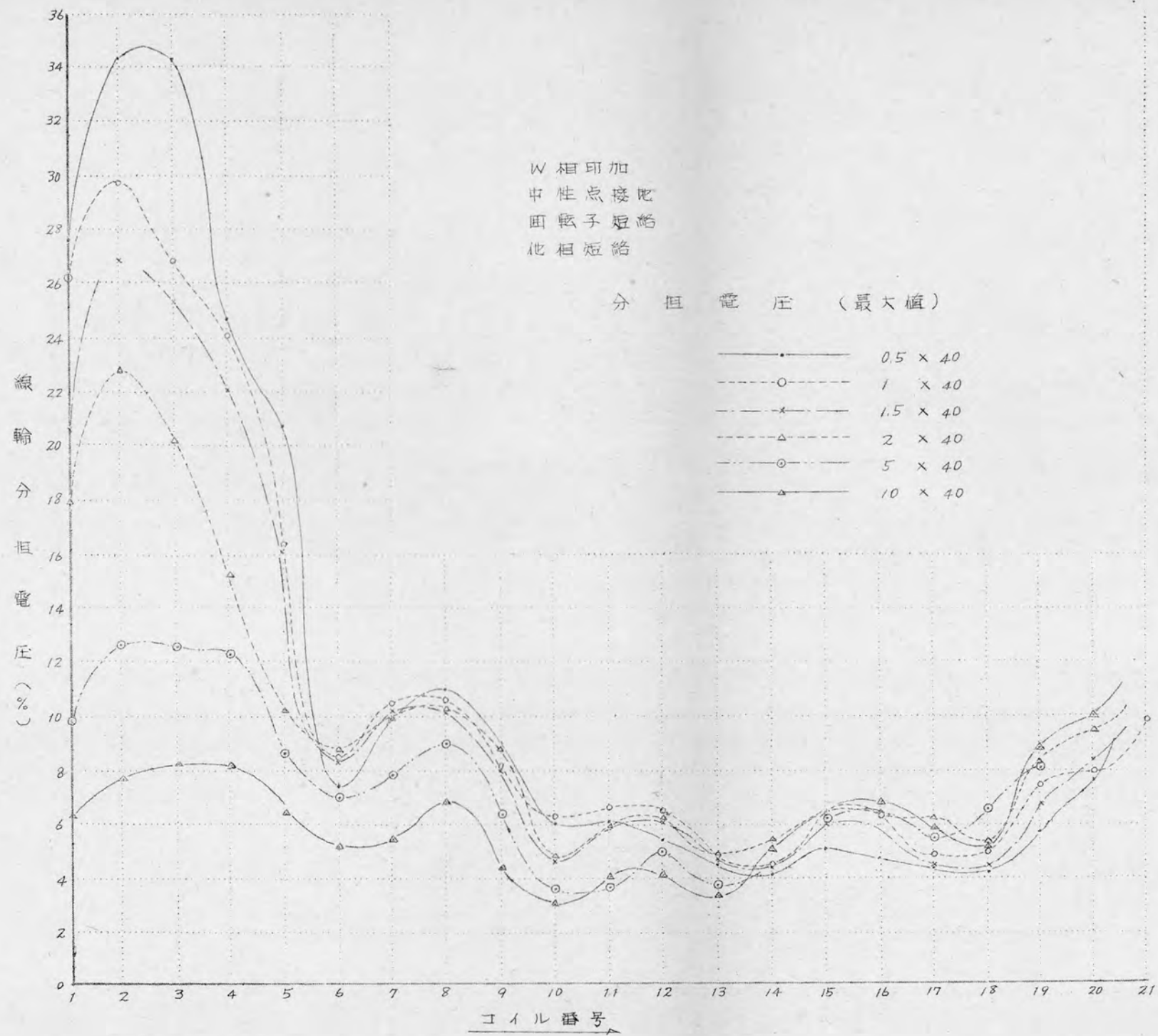
巻回間の分担電圧は発電機の構造、すなわち、発電機の容量、定格電圧、回転数および GD^2 に関係するものと考えられる。

さらに巻線中の各線輪の線輪分担電圧と波頭長との関係を実測より求めた曲線の一例として、4,800 kVAの実測結果を挙げる、第4.45図、第4.46図である。第4.45図はW相巻線に対するもの。第4.46図は三相一括してW相巻線の線輪分担電圧を測定し、各線輪の最大分担電圧を取って、各波頭長に対する曲線を求めた。始端の対地電圧を100%として求めている。第4.14図、第4.15図は12本の線輪について求めたもので、実際の発電機においても同様な曲線となっている。ただ三相一括した場合は一相の場合より幾分要なっているのは、各相間の相互インダクタンスの作用によるものである。

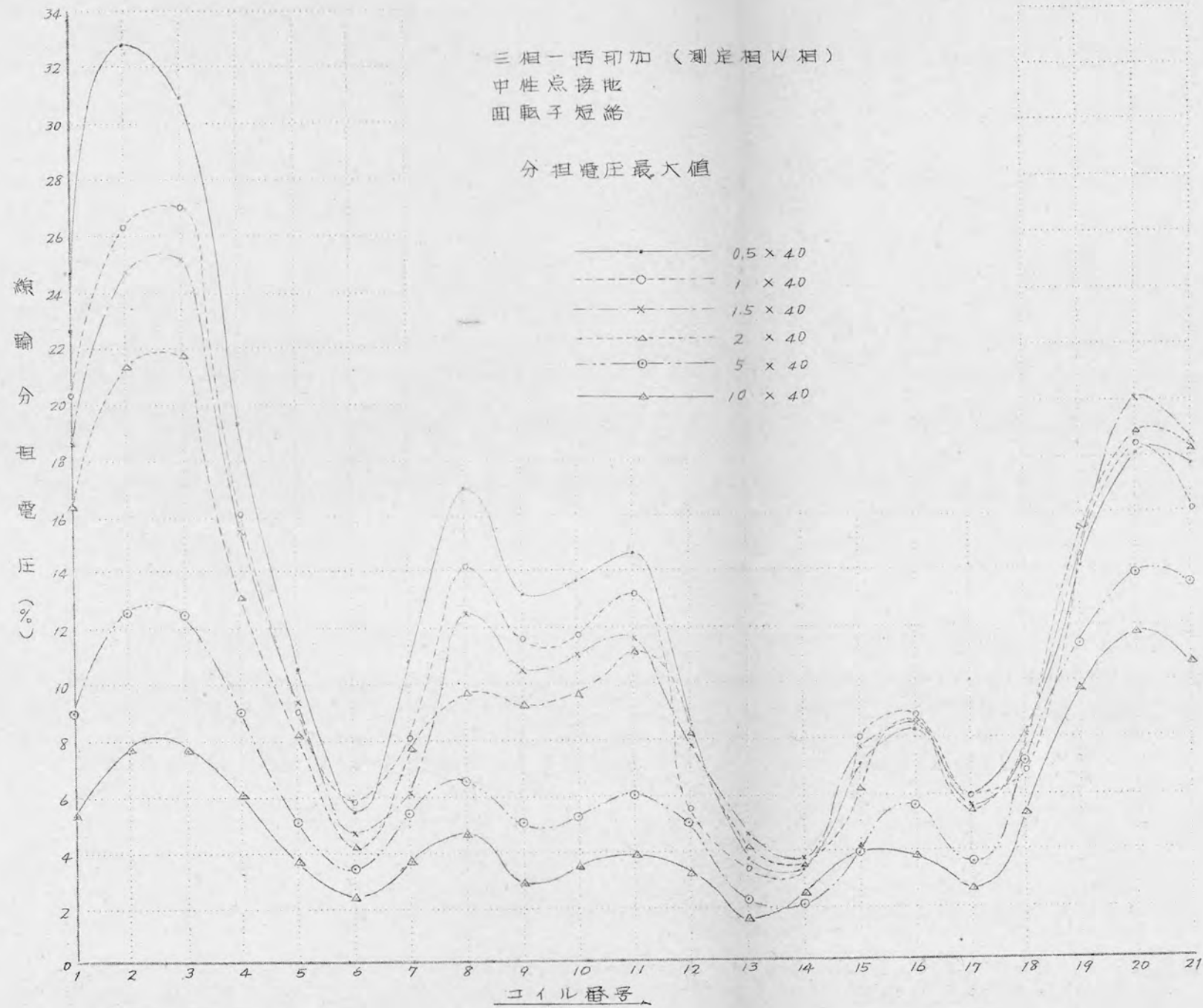


第 4.4.4 図 巻回間分担電圧と波頭長との関係曲線

142 項欠



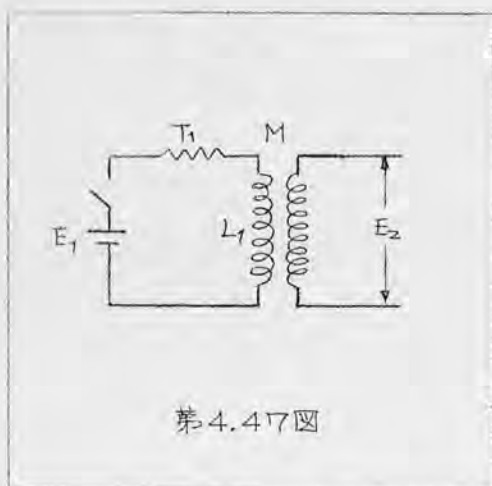
第 4.45 図



第 4.4 6 図 三相一括分担電圧

§.4.7 回転子巻線の誘導電圧

固定子巻線に衝撃波が侵入して来た場合回転子巻線へ誘導電圧は電磁誘導なること、回転子磁極間に位置している巻線において回転子巻線との結合度が初期において大きいことを第3節第3.4節において述べた。本節においては発電機に衝撃電圧試験を実施するに当って、回転子巻線の処置を如何にすべきかを検討するため400kVA、4375kVAおよび11,000kVA発電機にて実測したオッシログラムについて説明する。



第4.47図

固定子巻線と回転子巻線とを第4.47図に示す集回路路として考えると、回転子巻線端子の誘起電圧 $E_2(t)$ は次式であらわされる。

$$E_2(t) = \frac{E_1 M}{L_1} e^{-\frac{R_1}{L_1} t} H(t) \quad \text{----- (4.43)}$$

したがって、回転子巻線の誘起電圧の最大値は固定子巻線の実効インダクタンスと固定子巻線と回転子巻線との実効相互インダクタンスとによって定まる。この固定子巻線の実効インダクタンスは、


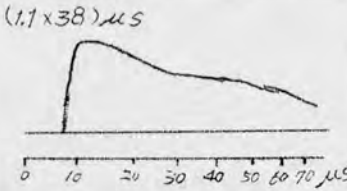
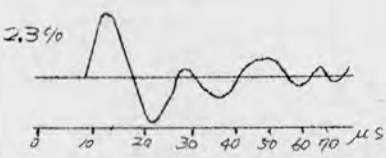
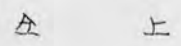

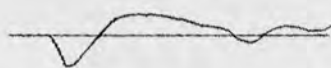
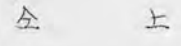


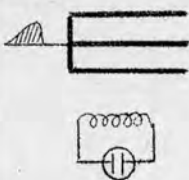
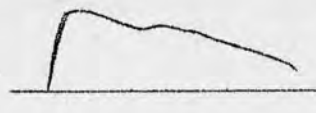

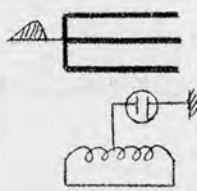
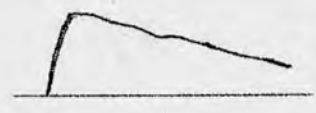
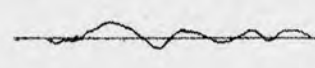
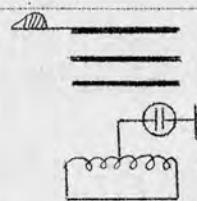


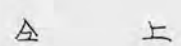


溝の鉄心の表皮効果、巻線方式、回転子磁極、さらに制動巻線の有無に関係するものである。また固定子巻線と回転子巻線間の実効相互インダクタンスは固定子鉄心、回転子磁極の位置と、鉄心の表皮効果、制動巻線の有無とに関係している。実際の程度の電圧が回転子巻線に誘起されるのが実測結果により説明する。

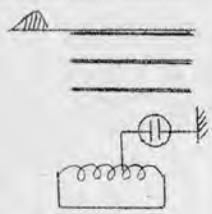


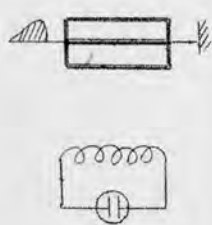


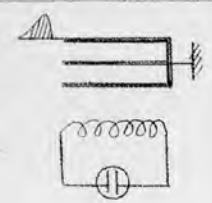

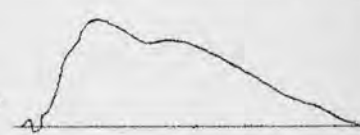

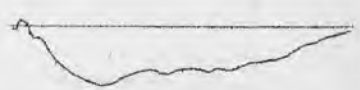


4.7.1. 400kVA 発電機の実測結果

第4.48図の結果から次のことが結論づけられる。

- (i) 回転子磁極と固定子巻線との相対位置については第3.2図に示しておいた。V相巻線は磁極間に位置している。第4.48図のオッシログラムよりV相巻線に電圧を印加した時の回転子巻線の誘起電圧が大きい。
- (ii) 試験ケースPで終端を開放した時、V相に $(1.1 \times 38) \mu s$ の衝撃波を印加した時の回転子巻線の誘起電圧は、2.3% (巻線の端子電圧に対する%)、Rケースで終端を接地したときのV相に対する回転子巻線の誘起電圧は4.4%を示している。
- (iii) Rケースに対する誘起電圧は各相巻線に対する誘起電圧の合成された電圧である。
- (iv) 回転子巻線の中間における対地電圧は第4.48図のオッシログラムより、巻線両端子の誘起電圧より小さい。

第4.48図 400kVA発電機における回転子巻線への誘起電圧

印加相	試験条件	印加波形	回転子巻線の誘起電圧波形
V相			
U相			
W相			
三相一括			
△上			
U相			
V相			

W 相			2.3% 
三 相 一 括			7.3% 
V 相			4.4% 
U 相	全 上		1.9% 
W 相	全 上		0.7% 

〔註〕 回転子誘起電圧波形の横中の%は印加電圧に対する回転子巻線端子への誘起電圧を表わす。

4.7.2. 4800 kVA 発電機の実測結果

$+ (5 \times 100) \mu s$ 及び $+ (6 \times 230) \mu s$ の衝撃波を発電機巻線に印加して、励磁巻線に誘起される電圧を測定した。

測定時における回転子磁極と巻線との位置は磁極の中心がU相巻線の各相における線輪群の中心と大体一致しており、磁極より見てU相の左側にV相巻線、右側にW相巻線が位置している。

測定は一相巻線へ印加し、他相巻線は開放、短絡した場合、三相一括して印加し、中性点を直接々地、 60Ω 抵抗接地、 500Ω 抵抗接地および回転子巻線に直列に 100Ω 、 $1K \Omega$ 、 $10K \Omega$ の抵抗を挿入して行った。その結果は第4.2

表に示す通りである。この表より考察すると下記の通りである。

第4.2表 回転子巻線への誘起電圧

番号	印加波形	印加相及び 中性点の条件	他相の状態	回転子巻線端 子の誘起電圧
1	$(5 \times 100) \mu s$	W相 N-E	他相 N-E, L-O	94%
2	"	W相, N-O	" N, L-E	12 "
3	"	"	" N-E, L-O	19 "
4	"	V相, N-E	" "	83 "
5	"	U相, "	" "	250 "
6	"	"	" N, L-E	170 "
7	"	" , N-O	" "	17 "
8	"	"	" N-E, L-O	30 "
9	"	三相一括, N-E		185 "
10	"	" , N-60Ω		60 "
11	"	" N-300Ω		23 "
12	$(6 \times 150) \mu s$	"		30 "
13	"	" , N-60Ω		83 "
14	"	" , N-E		200 "
15	"	"	$r = 100 \Omega$	5 "MF
16	"	"	$r = 1 k \Omega$	35 "
17	"	"	$r = 10 k \Omega$	91 "
18	"	U相, N-E	他相 N-E, L-O	260 "
19	"	"	" N, L-E	200 "
20	"	" , N-O	"	21 "
21	"	"	"	34 "

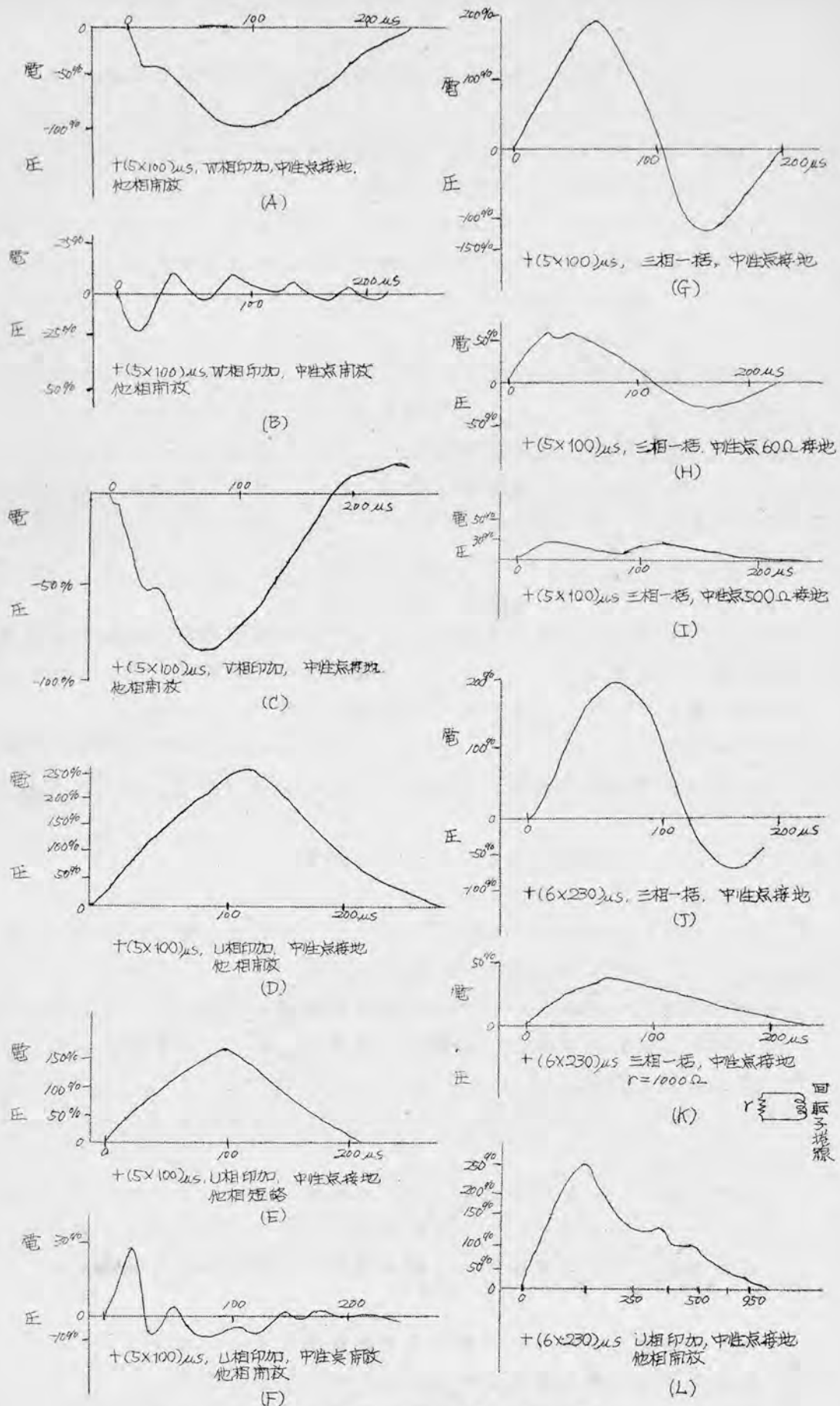
註1. N-E, N-Oは中性点接地 開放を表す

2. L-E, L-Oは出力端子 " "

3. r は回転子巻線に直列に挿入せる抵抗

(i) $(5 \times 100) \mu s$ の斬波波を一相の巻線に印加し、印加相の中性点は接地、他相の中性点も接地し、出力端子を開放という状態で、回転子巻線の端子に誘起される電圧は印加電圧を100%とし、U相に印加したときは250%、W相印加のときは94%、V相印加のときは83%である。回転子巻線の誘起電圧を第4.49図に示す。

(ii) 第4.49図より、W相巻線に対する回転子巻線の誘起電圧の初期の電圧上昇はU相におけるより速い。U相は初期において回転子磁極の鉄心の表皮効果のため回転子巻線と鎖交する磁束が少いが、波尾長が長いので時間が経つにつれて、鉄心内を重なる磁束が次第に増す。すなわち磁気抵抗が次第に減少するためである。



第4.49図 回線子線線への誘起電圧

(vi) したがって、回転子巻線の絶縁を脅かすのは進行波の波頭高度でなく、波尾長が長いことにある。

(vii) 三相一括して $+(5 \times 100) \mu s$ の衝撃波を印加した場合、中性点の状態によっても回転子巻線への誘起電圧は異なってくる。

即ち、中性点接地のとき回転子巻線への誘起電圧を100%とすると、

中性点 60Ω 抵抗接地のとき回転子巻線への誘起電圧は 32%

〃 500Ω 〃 〃 〃 12%

〃 開放の場合 5%以下

(viii) 回転子巻線の端子に抵抗を直列に挿入し、中性点は直接々地の状態で三相一括して、 $+(6 \times 230) \mu s$ の衝撃波を印加し、印加電圧を100%としたときの回転子巻線への誘起電圧は次の通りである。

(i) 100Ω の抵抗を^{回転子}励磁巻線の端子に直列に挿入したときの誘起電圧は5%以下

(ii) $1 K \Omega$ 〃 〃 〃 35%

(iii) $10 K \Omega$ 〃 〃 〃 91%

となる。したがって常時運転中においては回転子巻線は制御用抵抗器と直流発電機に接続されているので、発電機巻線に衝撃波が侵入しても回転子巻線の端子には第4.2表の如く高い電圧は誘起されない。

(ix) 印加波形 $+(5 \times 100) \mu s$ $+(6 \times 230) \mu s$ による回転子巻線への誘起電圧の大きさは波尾長が長い $(6 \times 230) \mu s$ の方が僅か大きい。

4.7.3. 11,000 kVA 発電機に対する実測結果

11,000 kVA 発電機は2台あって同一製作所の設計で、定格仕様は同一である。たゞ一方は制動巻線を有している。この両機の回転子に誘起する電圧を実測した。測定回路は第4.50図に示す通りであり、試験条件として回転子巻線を閉路した場合、ならびに励磁機を接続した場合の二通を取った。

測定結果は制動巻線がない発電機のを第4.3表に、制動巻線を有する発電機のを第4.4表に示す。

第4.3表、および第4.4表のオッシログラムは附録第5.1図と第5.2図に掲げてある。

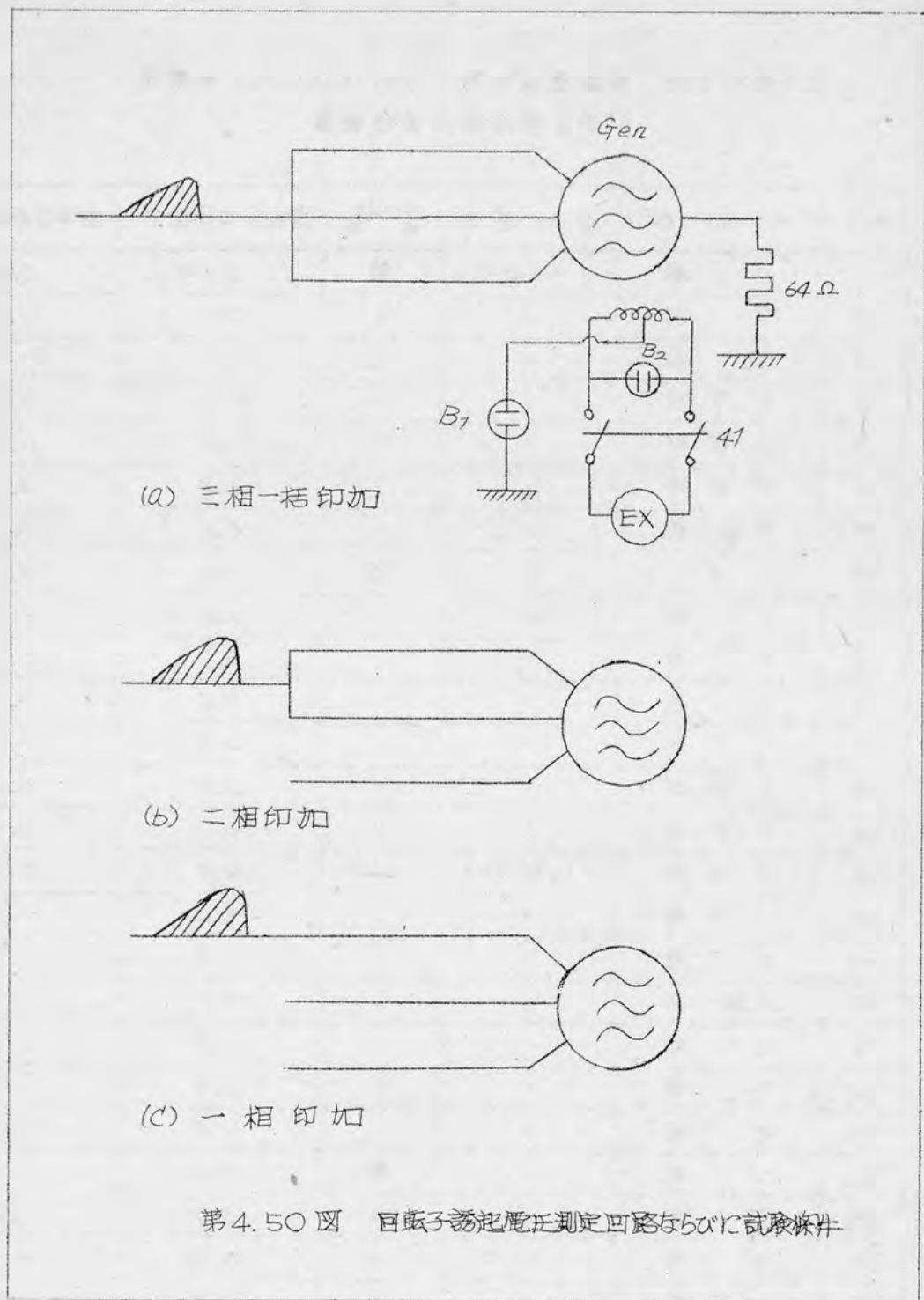
本測定においては回転子磁極と固定子巻線との相対的位置について調べることはできず不明である。この測定結果より次のことが結論づけられる。

(i) 制動巻線を有する発電機の回転子巻線への誘起電圧は初期において小さい。

(ii) 回転子巻線の中程の対地電圧は巻線両端子間の大体 $\frac{1}{2}$ 以下である。

(iii) 制動巻線の効果も時間が経つにしながら減少する。

(iv) 制動巻線がある発電機では回転子巻線に励磁機を接続した時と切り離れた時と切り離れた時では巻線の端子、および巻線の中程の対地電圧は少し



た変化が見られない。

- (V) 制動巻線がない発電機の回転子巻線の端子電圧は励磁機を接触することにより僅か減りする。巻線の中程の対地電圧は余り変化してない。

第4.3表 制動巻線を有しない11,000 kVA 発電機
回転子誘起電圧測定結果

番号	印 加 相	印 加 波 形	井 4 1 床	回転子両端電圧	回転子対地電圧
1	U 相	(1×40) μ s	閉	2.1%	0.8%
2	V 相	"	"	2.1	0.5
3	W 相	"	"	1.2	0.2
4	U V 相	"	"	2.9	0.4
5	U W 相	"	"	3.0	0.9
6	V W 相	"	"	3.9	0.9
7	三相一括	"	"	4.6	0.5
8	"	"	閉	4.4	0.3
9	U 相	"	"	1.9	1.0
10	V 相	"	"	2.5	0.6
11	W 相	"	"	2.5	0.3
12	U V 相	"	"	2.8	0.4
13	U W 相	"	"	2.9	0.9
14	V W 相	"	"	3.0	0.7
15	V W 相	(1×80) μ s	"	4.7	1.0
16	U W 相	"	"	3.2	1.1
17	U V 相	"	"	3.1	0.7
18	三相一括	"	"	4.5	0.6
19	U 相	"	"	2.8	1.0
20	V 相	"	"	2.4	0.7
21	W 相	"	"	2.4	—
22	U 相	"	開	2.0	0.5
23	V 相	"	"	3.0	0.4
24	W 相	"	"	3.2	0.9
25	U V 相	"	"	3.3	0.9
26	U W 相	"	"	4.8	0.4

第 4.4 表 制動巻線を有する 11,000 kVA 発電機
回転子誘起電圧測定結果.

番号	印 加 相	印 加 波 形	# 4 1 開 閉	回転子両端電圧	回転子対地電圧
1	U 相	(1×40) μ s	開	1.3 %	1.7 %
2	V 相	"	"	0.8	0.6
3	W 相	"	"	0.8	0.5
4	U V 相	"	"	1.2	1.0
5	三相一括	"	"	1.3	1.0
6	U 相	"	閉	1.3	1.2
7	V 相	"	"	1.0	0.7
8	U V 相	"	"	1.5	1.2
9	三相一括	"	"	1.6	1.0
10	U 相	(1×80) μ s	"	0.6	1.7
11	V 相	"	"	2.3	1.0
12	W 相	"	"	1.6	0.8
13	U V 相	"	"	2.6	1.1
14	三相一括	"	"	4.4	1.1
15	U 相	"	開	1.5	1.6
16	V 相	"	"	1.7	1.1
17	W 相	"	"	2.3	0.5
18	U V 相	"	"	1.7	1.1
19	三相一括	"	"	3.7	1.1

§4.8 結 言

本章において発電機巻線の侵入波に対する電圧分布について論じて来たのであるが、これを要約すると次の通りである。

1. 線輪を L, C, R の定数をもつ第 1 種梯子型四端子回路とし、巻線とその縦軸回路と見做して求めた一般式は、線輪を直列に接続した場合の実際の波形とよく一致する。
2. 巻線の対地電圧は回転子磁極による影響は僅かで、回転子磁極に面している巻線の中程の線輪対地電圧は回転子がない場合よりやや高い。
3. 巻線の対地電圧は終端を接地した状態において巻線の中程点の始端電圧の 80 % 位であるが、それより終端側の対地電圧は急速に減少する。
4. 巻線の終端を開放したときは終端電圧が最大で始端対地電圧の 160 % ~ 170 % 位の値である。減衰率は発電機によって異なるが 15 % ~ 20 % 位

である。

5. 各相巻線の対地電圧、同相の分岐巻線の対地電圧は平衡状態にない。また接地電流も平衡していない。
6. 線輪の分担電圧は波頭長により変る。波頭峻度が急峻な場合は分担電圧は大きい。
7. 巻回間分担電圧はその線輪の分担電圧と巻回数で割った値に等しい。
8. 線輪分担電圧は回転子磁極の存在により、大した影響はない。
9. 巻線中の線輪分担電圧は波頭峻度が急峻な場合は始端に近い線輪は高く、中程の線輪は小さく、終端接地においては終端に近い線輪の分担電圧はやゝ大きくなる。波頭峻度が緩やかになるにつれて、巻線中の線輪分担電圧は大体等しくなる。波頭長が $5\mu\text{s}$ 以上では大体等しい。
10. 巻線中の個々の線輪分担電圧は巻線方式、極間接続方式により充分異なっている。
11. 回転子巻線の端子の誘起電圧は初期においては回転子磁極面に位置している巻線からの磁束によるのが大きく、回転子磁極に面している巻線よりの磁束は磁極の鉄心の内部表皮効果のため抑制される。
12. 長波尾長の進行波に対しては磁極鉄心の内部表皮効果が時間の経過につれ減少し、磁極の鉄心を通る磁束が増してくるので、磁極に面した巻線による回転子巻線の誘起電圧が最大となる。
13. 標準波に対する回転子巻線の誘起電圧は大体5%以下である。長波尾長においては巻線の始端電圧の250%になることもある。
14. 制動巻線は初期において回転子巻線の誘起電圧を抑制する効果がある。

第5章 発電機衝撃電圧試験波形と試験電圧

第5章 発電機衝電圧試験波形と試験電圧

§ 5.1 緒 言

変圧器に対する衝電圧試験は購入試験としてすでに実施されている。変圧器は送配電線に直接接続され、絶えず雷その他線路の閉閉、一線接地事故に基因する異常電圧の襲撃を受けるが、これら侵入波による変圧器巻線の電圧分布および絶縁強度は商用周波数に対するものとは着しく趣を異にするので、商用周波数絶縁耐力試験を実施しただけでは不十分であるため、衝電圧試験を実施することになり、1945年に電気学会電気規格調査会標準規格として、JEC-110変圧器衝電圧試験標準規格が制定された。

発電機絶縁に対する試験規格はJEC-114(1950)同期機標準規格により規定されている。すなわち10,000をVA、6,000V以上の発電機では周波数が50Hzまたは60Hzで、なるべく正弦波に近い交流電圧 $2E + 2,000$ V (Eは定格電圧) を1分間加圧して行う商用周波数絶縁耐力試験のみである。

したがって、線輪の巻回間絶縁耐力試験は購入試験として行われていない状態であるので、使用者側としては巻回間絶縁が使用に十分耐えうるものな否かを知らることができない。製造者は線輪毎に高周波試験を行い、巻回間の絶縁を調べているが、巻線が組立てられた状態においては巻回間の絶縁試験は行われていない状態である。それ故に^(電)発生機巻線が組立てられた状態において巻回間絶縁の絶縁強度を確かめる試験が要求されるのである。

発電機線輪の絶縁については第1章第1.2節に述べた通り乾式であり、かつ限定された鉄心力責に納められているので、巻回間絶縁の絶縁強度を対地絶縁強度と同等にすることは発電機の構造を大きくするか、または温度上昇を高める結果となり、現実問題としては到底不可能である。それ故に波頭峻度の急峻な侵入波に対して巻回間絶縁が耐えるように絶縁を施行することは不可能である。したがって侵入波に対する防護対策として回転機用避雷器および保護蓄電器を設置するようになって来た。しかしながら、このように侵入波に対する防護装置を施行しても、緒言において述べた如く、絶縁材料の不良とか、また絶縁処理が不十分のため、絶縁強度にむらがあったのでは、巻回間絶縁の破壊から発電機の焼損事故を惹き起す結果となる。したがって^(巻回)層間絶縁としては絶縁材料ならびに処理方法の改善も必要であるが、回転機用避雷器および保護蓄電器の防護装置を加味して、線輪の対地絶縁との協調した絶縁強度を有するように設計し、製作することが必要である。

かように組立てられた発電機巻線の巻回間絶縁が防護装置を加味した状態において対地絶縁と協調を保ち、長年月の使用に耐えるということを確かめるためには商用周波数絶縁耐力試験を施行しても不可能であるので、衝電圧試験に

よるのが最も適切と考えられる。すなわち 発電機には雷 変圧器の励磁電流遮断時における再点弧電圧および開閉サージが侵入し、発電機の絶縁特に巻回間絶縁を脅すのであるから、衝電圧試験を実施することが 発電機の対地絶縁は勿論、巻回間絶縁にとっても実際的である。

したがって 発電機に衝電圧試験を施行するには、回転機用避雷器および保護蓄電器との協調が必要条件となるので、この必要条件を満足し、かつ実行が容易な衝電圧試験を制定する必要がある。

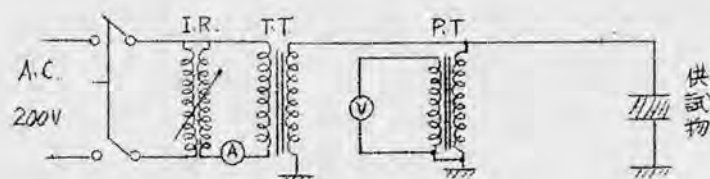
筆者は本章において発電機衝電圧試験をして、その試験の目的を十分果すに必要な 試験電圧 および試験波形について述べる。

§5.2 発電機の絶縁強度

現在電力会社で運転している発電機の絶縁耐力がどの程度のものであるかを知る必要がある。運転使用中の発電機に電圧を印加し、絶縁強度を調査することは不可能であるので、使用年限の長い発電機とか、焼損事故の回数が多い発電機で、全線輪の巻替えを行う発電機に対し、交流 および衝電圧を印加して、対地絶縁および巻回間絶縁の破壊試験を実施した。したがって絶縁破壊を行った発電機の絶縁は電力会社の保守の見地からは使用に耐えない。すなわち寿命が来ている発電機と考えられるものである。さらに最近製作された線輪の絶縁耐力がどの程度のものであるかをも述べる。

5.2.1 絶縁破壊試験の方法

運転していた発電機の絶縁破壊は交流電圧と衝電圧と二通り行った。交流電圧による絶縁破壊は各相毎に実施し、絶縁が破壊すれば、その箇所の線輪を取り除いて、なるべく資料を集めることにした。交流電圧による絶縁破壊試験は各相巻線毎に実施しているので、線輪の対地絶縁、継線および渡り線の対地絶縁を対称としたものとなる。試験回路の一例を示すとオ5.1図に示す通りである。

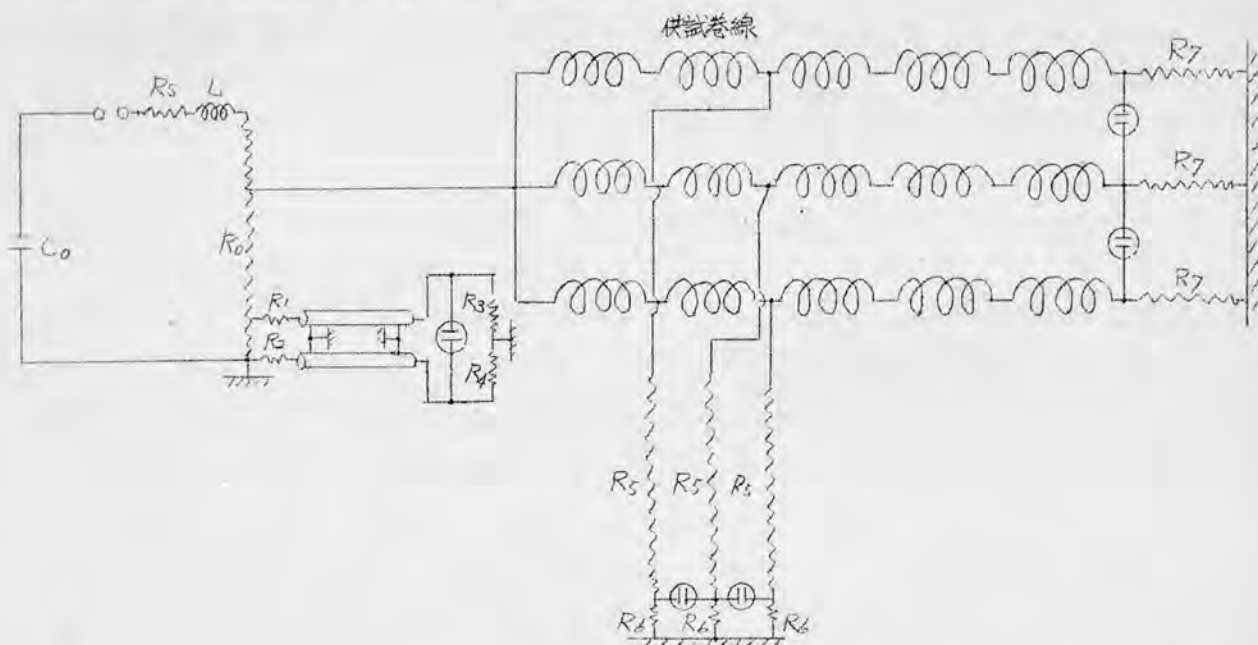


- I.R. 誘導電圧調整器 200V±200V
- T.T. 試験用変圧器 50000V/400V 5kVA
- P.T. 計器用変圧器
- Ⓥ 電 圧 計
- Ⓐ 電 流 計

オ5.1図 試験回路

次に衝電圧試験は巻回間絶縁および対地絶縁の衝電圧に対する絶縁破壊電圧を測定し、巻回間絶縁耐力と対地絶縁耐力との関係を求めることにした。種々試験回数が多いのと、各相巻線毎に試験を行うので、特定の破壊電圧となる。しかし、実際の運転状態と同様な状態に各相巻線がおかれて試験しているので、進行波が巻線に侵入した場合には、先づ最初漏められる箇所と同一箇所がこの試験において破壊するので、発電機の保守の点から当該発電機の破壊電圧値と考えることができる。

本試験は巻回間絶縁の破壊電圧値を精確に求めるため、オ6章に述べる巻回間絶縁破壊検出法を採用した。したがって、一重Y結線では二相または三相一括し、二重、三重および四重Y結線では一相毎に試験を実施した。試験回路の一例を図示したのが、オ5.2図である。巻回間絶縁破壊の検出についてはオ6章において詳述しているので参照されたい。



オ 5. 2 図

さらに最近製作された線輪の試験は線輪単独で試験を行ったもので、回転機衝電圧試験標準規格調査委員会^②の資料を備用することにした。

5.2.2 試験結果と旧呂発電機の絶縁耐力

5.2.1の試験方法で測定した、発電機の交流電圧に対する絶縁破壊電圧値を表にして示したのがオ5.1表、さらに衝電圧に対する値を示したのがオ5.2表である。

オ5.1表 交流電圧による絶縁破壊電圧

供試発電機			対地絶縁破壊値 (kV)					製造年月	備考
容量 (kVA)	電圧 (kV)	対地絶縁寸法 (mm)	オ1回	オ2回	オ3回	オ4回	オ5回		
4375	12	4	31	31.5	10.5	33.6	32	大正14年8月	白相4分割して試験 10.5 kVは渡り線
1000	11	3	25.8	30.6	24.9	18.9			1相30本で3対元10回試験を行 う渡り線2回、30 kV迄印加し て破壊しない場合オ4回
11000	11	4.65	36.0					昭和18年	渡り線
25000	11		30.0	20.0	25.0	23.8	22.5		黒相にて実部回数12回そのス ロット内を破壊したのが6回他 は渡り線で放電
8000	6.6		21.0						
4800	6.6	3.5	16.0						黒相
4375	6.6		20.0	18.0				昭和2年	
4500	3.5		4.5	4.0	6.0	6.0	7.0		1回〜3回はV相 4回、5回はW相
400	3.45		4.5	5.1	4.0			大正4年	

註 試験時の温度は平常温度

オ5.2表 衝撃電圧による絶縁破壊電圧

供試発電機					印加波形 (T ₁ × T ₂) μs	巻回間が破壊 した時の印加 電圧 (kV)		対地絶縁が破 壊した電圧 (kV)		備考
容量 (kVA)	電圧 (kV)	巻回間電 圧 (V)	対地絶縁 寸法 (mm)	巻回間絶縁 寸法 (mm)		オ1回	オ2回	オ1回	オ2回	
4375	12	21	4	0.8	(0.5 × 130)	26		46		
25000	11	84.2			(1.5 × 32)	46.2		55以上		
1000	11	18.5	3		(1.0 × 40)	21	15.2	21.4	18.7	
4375	6.6	35.3			(2.0 × 40)	44 kV 破壊せず	26.0	44.0	41.7	
* 4800	6.6	43.3	3.5	2	(1.0 × 200)	16.2		24.0		印相を廻り端子 より4番目の スロットの出口
1500	6.6	19.8			(1.2 × 35)	37.8 kV迄 破壊せず		37.8		
4500	3.5	15.2			(1.0 × 20)	11.5 kV迄 破壊せず	10.8 kV迄 破壊せず	11.5	10.8	オ1回はU相 オ2回はV相
400	3.45	7.8			(1.2 × 32)	3.8		10.0		
11000	11	26.4	4.65	0.9	(2 × 25)	54 kV迄 破壊せず		54.0		渡り線

註 * 白相右廻りは + (4 × 70) μs にて 40 kV で対地絶縁が破壊した。

オ5.1表およびオ5.2表の結果をはっきりさせるために検討を加えてみる。
まず 交流破壊において JEC-114 の商用周波数絶縁耐力試験の規定に対

する絶縁破壊電圧の比を求めてみる。この場合、JECの規定では試験電圧を1分間加圧することになっているが、オ5.1表の試験は毎秒大体3000Vの割合で電圧を上けているので、破壊電圧はJECの規定における試験電圧と比較すると破壊電圧が幾分高くなる。その電圧が高くなる割合は厳密にすることができないので、オ5.1表の絶縁破壊電圧をそのまま使用する。JEC-114の絶縁耐力試験規定に対する破壊電圧の比を求めたのが、オ5.3表である。なお絶縁破壊を二回以上実施した場合は、その中最低の値を採用することにした。

オ 5. 3 表

容量 (KVA)	電 圧 (kV)	絶縁破壊 電圧値 (kV)	J E C 試験 電 圧 (kV)	絶縁破壊電圧 JEC試験電圧
4375	12	31.0	24.0	1.29
1000	11	18.9	24.0	0.79
11000	11	36.0以上	24.0	1.50以上
25000	11	20.0	24.0	0.83
8000	6.6	21.0	15.2	1.38
4800	6.6	16.0	15.2	1.05
4375	6.6	18.0	15.2	1.18
4500	3.5	4.0	8.9	0.45
400	3.45	4.0	8.9	0.45

註 JECは容量 定格電圧により試験電圧が異なるが、こゝでは(2E+2000)を採用した。ただし Eは定格電圧

オ5.3表の絶縁破壊電圧/JEC試験電圧から次の事が考察される。

1 供試発電機9台中JEC規格の試験電圧にて絶縁破壊すると考えられる台数は4台である。またなんとか耐えられるであろうx台数(絶縁破壊時の電圧は大体毎秒3000Vの割合で電圧を上昇しているので、1分間試験よりは絶縁破壊電圧が高くなる傾向を有している。それ故に絶縁破壊電圧/JEC試験電圧の比が1.2以上(裕度として20%を見込んだ)であることが望ましいと言える)は4台で、十分耐えうると考えられる台数は1台である。

2 この9台の発電機は運転実績から線路絶縁を全巻替する必要ありと結論を下したもので、オ5.3表の結果は発電機が絶縁劣化した場合の目安と考えられる。

次にオ5.2表の結果から、巻回間絶縁の破壊電圧をオ4章オ4.4.4図の波頭長対線路巻回間分担電圧の曲線を使用して求め、運転時にかかる巻回間電圧の波高値×1.25に対する倍数を求めたのがオ5.4表である。

オ 5. 4 表

供試発電機		印加波形 ($T_F \times T_r$) μs	巻回間が破壊 した時の印加電 圧 (kV)	巻回間が破壊し た電圧 (kV) ;	運転時にか かる巻回間 電圧波高値 (kV)	巻回間が破壊 した電圧 運転時にかかる 巻回間電圧波 高値 $\times 1.25$ (倍)
容量 (kVA)	電圧 (kV)					
4375	12	(0.5×30)	26.0	12 (46%)	0.037	33
25,000	11	(1.5×32)	46.2	3.9 (8.4%)	0.149	26
11,000	11	(2.0×25)	54.0以上	3.4以上 (6.3%)	0.047	73以上
1,000	11	(1.0×40)	15.2	0.6 (4.0%)	0.033	18
4375	6.6	(2.0×40)	26.0	2.1 (8.1%)	0.062	34
4,800	6.6	(1.0×200)	16.2	1.6 (6.0%)	0.077	21
1,500	6.6	(1.2×35)	378以上	2.1以上 (5.6%)	0.035	10以上
4,500	3.5	(1.0×20)	10.8以上	1.1以上 (10.0%)	0.027	4以上
400	3.45	(1.2×32)	3.8	* 0.06 (1.6%)	0.014	43

- 註 1. 1のく)の中は印加波形の波頭長に対する1巻回間の分担巻を
電圧
オ4.44図より求めた値
2. *の値は巻回間の絶縁破壊としたが、層間の絶縁で考えると大体2
kVと考える。

さらに対地絶縁の衝撃電圧に対する破壊電圧を回転機用避雷器^①の制限電圧との
比較ならびにJECの商用周波数絶縁耐力試験電圧との比較を行ったのが、
オ5.5表である。

オ 5. 5 表

供試発電機		衝撃波による 破壊電圧 (kV)	避雷器の 制限電圧 (kV)	$\sqrt{2}(2E+2) \times 1.25$ (kV)	破壊電圧	破壊電圧
容量 (kVA)	電圧 (kV)				制限電圧	$\sqrt{2}(2E+2) \times 1.25$
4375	12	46.0	40	42.5	1.11	1.08
25,000	11	55.0以上	40	"	1.37以上	1.30以上
11,000	11	54.0	40	"	1.35	1.27
1,000	11	18.7	40	"	0.48	0.44
4,375	6.6	41.7	24	26.8	1.74	1.55
4,800	6.6	24.0	24	"	1.0	0.90
1,500	6.6	378	24	"	1.58	1.41
4,500	3.5	10.8	12	15.7	0.90	0.67
400	3.45	10.0	12	"	0.83	0.64

註 1. 25は衝撃比^②

オ5.4表の中 11 kV, 11,000 kVA は印加電圧 54 kV で対地絶縁が破壊し
たが、それと巻回間の絶縁は破壊しなかった。また、6.6 kV, 1,500 kVA の

発電機は3ス8㍉Vで対地絶縁が破壊したが、それ迄巻回間絶縁は破壊しなかった。3.5㍉V、4500㍉VA発電機は最初衝量電圧を印加した時、対地絶縁が破壊したので、巻回間絶縁をも破壊したかどうかを確かめることが出来なかった。したがって巻回間絶縁の破壊電圧の運転時にかかる巻回間電圧の波高値に対する倍率が4倍以上というのははっきりしない。そこでオ54表の結果から巻回間絶縁の破壊電圧は破壊したものについてみると、運転時にかかる巻回間電圧の40倍以下であることがいえる。それ故に巻回間電圧の40倍以上の電圧に耐えることが要求される。

オ55表の結果、回転機用避雷器の制限電圧に耐えられぬ発電機が9台中4台ある。また固定子巻線の絶縁の衝量比を1.25^②として、商用周波数絶縁耐力試験の試験電圧(2E+2)㍉V、(ただしEは定格電圧)に対する対地絶縁の破壊電圧の比を求めた結果、9台中4台が試験電圧(2E+2)㍉Vより低く、最大は1.55倍で、0.55倍の余裕がある。

以上の結果より、使用に耐えないと判断された発電機の線輪の巻回間、および対地の絶縁の絶縁耐力の大体の数値を知ることができた。

5.2.3 最近製作される発電機の絶縁耐力

近年、発電機線輪絶縁に対する研究が進み、使用絶縁材料の優秀なもの、および絶縁施工法の改善が行われている。例えばB種絶縁にはマイカ紙を使用しているが、天然マイカをそのまま使用するのではなく、化学的に処理再生して、連続マイカシートが出現して来た。また含浸剤、接着剤についていろいろ研究されて来ており、従来のワニス、コンパウンドの外に、合成樹脂系のもので使用されて来ている。

このように絶縁材料の進歩、施工法の改善されつつある今日、各製機所で製作される線輪のもつ絶縁耐力がどの程度のものであるかを調べたのがオ56表である。

オ 5 6 表^②

整理 番号	電 圧 (㍉V)	容 量 (㍉VA)	絶 縁 種 別	対地絶縁破壊電圧(㍉V)		巻回間絶縁破壊電圧(㍉V)		巻 回 数	備 考
				A-C	Impulse	A-C	Impulse		
11-1	11	2300	B	75.0	73.8以上	38.0	54.0以上 (121×48)	6	
11-2	11	15,000	B	44.5以上	80.0以上	18.2	37.5以上 (12.5×45)	4	
11-3	11	8,000	B	49.8	90.2以上	22.0	47.6 (1×40)	3	
11-4	11	30,000	B	55.6以上	71.1以上	19.1以上	46.9以上 (1×40)	3	
11-5	11	17,000	B	59.7	71.5以上	27.3以上	33.1以上 (1×40)	7	
11-6	11	8,800	B	80.0		33.0以上	42 (1×40)	4	
11-7	11	25,000	B			27.2以上		3	
11-8	11	25,000	B	64.5	65.9	31.0	59.8 (1×40)	3	
3-1	3.5	750	B	30.0	3.5		3.5	10	

整理 番号	電 圧 (kV)	容 量 (kVA)	絶 縁 種 別	対地絶縁破壊電圧(kV)		巻回間絶縁破壊電圧(kV)		巻 回 数	備 考
				A.C.	Impulse	A.C.	Impulse		
3-2	3.5	1070	A	220		1.4		6	
3-3	3.5	1450	B	25.5	524	6.5	15.0 (1x40)	7	
3-4	3.5	1250	B	270以上	380	120以上	140以上	3	
3-5	3.5	250	A	30.0		137		16	
3-6	3.5	250	A	15.0		1.2		15	
3-7	3.5	140	B	24.2		43.5		18	日種ガラス ケース

(註) 1. 絶縁破壊電圧中「以上」とあるは内絡等によりこれ以上電圧を上昇することができなかったもので、破壊電圧はこれ以上あるがその値が測定することができなかったものである。

2. 巻回間絶縁破壊電圧の Impulse 中()内は印加波形を示す。

オ5.6表に基づいて、線輪の対地絶縁の商用周波破壊電圧を JEC の商用周波数絶縁耐力試験電圧 $(2E+2)$ kV (ただし、Eは定格電圧) に対する倍数、衝撃電圧による絶縁破壊電圧を回転機用避雷器の制限電圧に対する倍数、および商用周波絶縁破壊電圧に衝撃比 1.25 を乗じて求めた破壊電圧の制限電圧に対する倍数を求めたのが、オ5.7表である。この表から下記のこと考察される。

オ 5. 7 表

整理 番号	JEC 試 験 電 圧 ($2E+2$) kV	対地絶縁 (A.C.)		避雷器の 制限電圧 (kV)	対地絶縁 (Impulse)		対地絶縁 (AC破壊電圧とImpulse 破壊を求めた)	
		A.C. 破壊電 圧 (kV)	A.C. 破壊電圧 JEC試験電圧		Impulse 絶縁 破壊電圧 (kV)	Imp. 破壊電 圧 制限電圧	A.C. 破壊電圧 \times $\sqrt{2} \times 1.25$ (kV)	A.C. $\sqrt{2} \times 1.25$ 制限電圧
11-1	24	75.0	3.10	40	73.8以上	1.85以上	133.0	3.32
11-2	"	44.5以上	1.85以上	"	80.0以上	2.0以上	78.8以上	1.97以上
11-3	"	49.8	2.08	"	90.2以上	2.26以上	88.0	2.20
11-4	"	55.8以上	2.28以上	"	71.1以上	1.77以上	99.5以上	2.49以上
11-5	"	59.7	2.48	"	71.5以上	1.78以上	105.0	2.63以上
11-6	"			"	80.0	2.0		
11-7	"	58.1以上	2.42以上	"	73.2以上	1.83以上	103.0以上	2.58以上
11-8	"	64.5	2.69	"	65.9	1.65	114.0	2.85
3-1	9	30.0	3.34	12			53.1	4.42
3-2	"	22.0	2.44	"			38.9	3.24
3-3	"	25.5	2.84	"	524	437	45.1	3.76
3-4	"	270以上	3.0以上	"	380	3.16	47.8以上	3.98以上
3-5	"	30.0	3.34	"			53.1	4.42
3-6	"	15.0	1.67	"			24.6	2.22
3-7	"	24.2	2.70	"			42.8	3.57

1. 商用周波による線輪の絶縁破壊電圧は最低が丁Eの絶縁耐力試験電圧 $(2E+2)$ をVの1.67倍で 2倍以上が15本の内13本であるので、一般に発電機線輪の対地絶縁耐力は $(2E+2)$ をVの2倍を有すると考えられる。A種絶縁とB種絶縁との相違は明確に出ていない。

2. 衝撃波による絶縁破壊は15本中10本で、その中内絡のため絶縁破壊電圧を印加電圧を上げえなかった線輪が6本で、絶縁が破壊した線輪は4本である。衝撃波による絶縁破壊電圧の国産機用避雷器の制限電圧に対する倍数は最低が1.65倍で、最高は内絡した線輪を除くと4.37倍である。

表 5. 3

整理 番 号	巻回間電圧 (V)	巻回間絶縁 (A.C)		巻回間電圧 $\times \sqrt{2} \times 1.25$ (kV)	巻回間絶縁 (Impulse)	
		A.C 破壊電圧 (kV)	A.C 破壊電圧 巻回間電圧		Impulse 破壊 電圧 (kV)	Impulse 破壊電圧 巻回間電圧 $\times \sqrt{2} \times 1.25$
11-1	0.0330	38.0	1.15×10^3	0.0583	54.0以上	0.93×10^3 以上
11-2	0.0396	18.2	0.47×10^3	0.070	37.5以上	0.55×10^3 以上
11-3	0.0220	22.2	1.01×10^3	0.0374	47.6	1.27×10^3
11-4	0.0642	19.1以上	0.29×10^3 以上	0.1130	48.9以上	0.43×10^3 以上
11-5	0.0378	27.3以上	0.72×10^3 以上	0.0686	33.1以上	0.48×10^3
11-6	0.0755	33.0以上	0.44×10^3 以上	0.1335		
11-7	0.0882	22.2以上	0.25×10^3 以上	0.156	42.0	0.27×10^3
11-8	"	31.0	0.35×10^3	0.156	59.8	0.38×10^3
3-1	0.0045	3.5	0.78×10^3	0.0795		
3-2	0.0133	1.4	0.10×10^3	0.0236		
3-3	0.0091	6.5	0.72×10^3	0.0161	15.0	0.93×10^3
3-4	0.0151	12.0以上	0.79×10^3 以上	0.0267	14.0	0.53×10^3
3-5	0.0075	1.37	0.18×10^3	0.133		
3-6	0.0080	1.2	0.15×10^3	0.142		
3-7	0.0053	4.35	0.85×10^3	0.0094		

3. 商用周波による対地絶縁破壊電圧を抜高値であらわし、さらに衝撃比 1.25 を乗じた値の制限電圧に対する倍数を求めると、内絡した線輪の1.97倍を除くと最低は2.2倍で、最高は4.42倍、大多数が2倍から4倍の値である。

4. したがって最近製作される線輪の商用周波数絶縁破壊電圧は、丁Eの試験電圧 $(2E+2)$ をVの1.67倍以上、また衝撃波に対する絶縁破壊電圧は国産機用避雷器の制限電圧の1.65倍以上あるものと考えられる。

次に線輪巻回間の商用周波数絶縁破壊電圧の常時運転中にかかる巻回間電圧に対する倍数と、衝撃波による巻回間絶縁破壊電圧の常時運転中にかかる巻回間電圧の抜高値に衝撃比 1.25 を乗じた値に対する倍数を求めたのが表 5. 3 である。この表より次のことが考えられる。

1 巻回間絶縁の商用周波による破壊電圧の巻回間電圧に対する倍率は100倍、180倍、150倍とA種絶縁の線輪が低く、B種絶縁では250倍以上で、最高1150倍となっている。したがって、A種絶縁は100倍程度、B種絶縁では200倍程度のものであることを知る。

2 衝電波による絶縁破壊は15本中9本実施しており、特にA種絶縁の線輪の試験データがない。B種絶縁では270倍が最低で、最高は1270倍である。したがってB種絶縁の巻回間絶縁耐力は常時運転中にかかる電圧の波高値に1.25を乗じた値の200倍程度のものであることを知る。

3 巻回間絶縁の絶縁耐力の常時運転中にかかる巻回間電圧に対する倍率が最低と最高との開きが10倍という大きいものになっている。この主なる理由は巻回間絶縁の施工法から来るもので、同一の条件に製作することができないこと、すなわち、むらがあることに基因している。これは例えばB種絶縁の巻回間絶縁は厚さ0.13mmのマイカテープを半重巻で1回又は2回を巻くのであるが、0.13mmの厚さはJESの規格で許容差を+0.09mm、-0.04mmにしている程、マイカテープの厚さは均一に製作できないので半重巻の回数が少いと、半重巻した時の厚さの不均一から巻回間絶縁耐力にはむらを生ずる。

5.2.4 考 察

以上線輪の絶縁が多化し、巻替を要する発電機の線輪対地絶縁および巻回間絶縁の絶縁耐力について実測結果から一応の値を知ることができた。しかし旧線輪の製作当時における絶縁耐力がわかっていないので長年月の運転使用によってどの程度の耐力の低下があるかを知ることができない。また最近製作された線輪の絶縁材料は旧品のものより進歩したものであり、また設計および施工法も改良されているので、最近の試験データを旧品のもの、同一強度の絶縁耐力を有しているものか、その点筆者は知り得ない。ただJECの商用周波数絶縁耐力試験規格が変わっていないので、線輪の対地絶縁耐力に対する裕度の取り方には大巾の変化はないと考えられる。

巻回間絶縁の絶縁強度の取り方は侵入波に対する巻回間の絶縁が問題になるまでは、常時運転中にかかる巻回間電圧を基準として設計されていたようである。侵入波に対する巻回間絶縁の絶縁強度と線輪の焼損事故の原因が巻回間絶縁の絶縁破壊にあるという事実から最近巻回間の絶縁強度を高くとるようになり、さらに絶縁処理の改善進歩により強化されてきた。したがって旧品線輪と最近製作される線輪との巻回間絶縁強度は比較し得ないものである。

それ故に旧品線輪に対する試験結果は電力会社の担当課でそれぞれ発電機の事故、空焚、および使用年限等を考えたうえ、線輪全巻替えを決定するもので本章の緒言に述べた如く、線輪としては大体寿命が来たものの絶縁耐力の資料と考えるのが妥当である。

今や5.3表、5.4表および5.5表の結果を纏めたのが5.9表である。この表を^{もと}元にして、強いて旧品線輪の結論を下すと次の通りになる。

1 対地絶縁の破壊電圧はオ59表においてそれぞれ求めた倍率が1/1以下のもの 巻回間絶縁の破壊電圧は巻回間電圧 $\times \sqrt{2} \times 1.25$ に対する倍率状態40倍以下のものは9台中7台である。

2 したがって 運転 使用に耐えうる線輪の対地絶縁の絶縁耐力の限界は

(1) 商用周波では $(2E+2)$ をVの1/1倍

(2) 衝撃波では 制限電圧の1/1倍

で 巻回間絶縁耐力の限界は

運転中の巻回間電圧に $\sqrt{2} \times 1.25$ を乗じた値の40倍以上
ということになる。

オ 5. 9 表

供 試 発 電 機		対 地 絶 縁			巻回間絶縁(Impulse)
容量(たVA)	電圧(たV)	AC 絶縁破壊電圧 ($2E+2$)	Impulse 破壊電圧 制限電圧	Impulse 破壊電圧 $\sqrt{2}(2E+2) \times 1.25$	破壊電圧 巻回間電圧 $\times \sqrt{2} \times 1.25$
4375	12	1.29	1.11	1.08	33
25,000	11	0.83	1.37以上	1.30以上	26
11,000	11	1.50以上	1.35	1.27	73以上
1,000	11	0.79	0.48	0.44	18
4375	6.6	1.18	1.74	1.55	34
4,800	6.6	1.05	1.0	0.90	21
1,500	6.6		1.58	1.41	60以上
4,500	3.5	0.45	0.90	0.67	47以上
400	3.45	0.45	0.83	0.64	43

長年月使用した発電機の絶縁耐力は丁Eの試験電圧 $(2E+2)$ をVの1/1倍なることを述べたが これについて さらに検討を加えてみる。筆者は運転使用中の発電機の絶縁診断法の一つとして 一部に使用されている交流耐圧試験の電圧を検討し、試験電圧は丁Eの試験電圧 $(2E+2)$ の65%が妥当なることを提案した。この提案による発電機の試験電圧の丁Eの試験電圧 $(2E+2) \times 1/1$ に対する倍率を求めると $\frac{1/1}{0.65} = 1.69$ 倍となり 後述する新品発電機線輪の絶縁耐力は丁Eの試験電圧 $(2E+2)$ の1.65倍であるという考え方と1.69倍の数値がほぼ一致する。すなわち 新品線輪の絶縁耐力は丁Eの試験電圧との間に 65%の裕度があるという考え方がそのまま運転中の発電機の絶縁耐力と試験電圧 $(2E \times 2) \times 0.65$ との間に適用出来るので、運転中の発電機の絶縁耐力は丁Eの試験電圧の1/1倍と考えることは一応の妥当性がある。

オ57表より各倍率の最少のものをもって、新品の線輪の対地絶縁強度となるすなわち

1 商用周波数絶縁耐力は $(2E+2)$ の 1.65倍

2 衝垂波絶縁耐力は 制限電圧の 1.65 倍
となり、オ5.8表より最少の倍率をもって、新品線輪の巻回間の絶縁強度とする。

1 A 種絶縁は 巻回間電圧の 100 倍

2 B 種絶縁は " 200 倍

となる。

したがって、新品線輪の対地絶縁強度はオ5.11表に示した値となる。

オ5.11表 新品線輪の対地絶縁強度

定格電圧 (kV)	JEC 試験電圧 ($2E+2$)(kV)	回転機用避雷器制限電圧 (kV)	対地絶縁強度(kV)	
			商用周波	衝垂波※
3.3	8.6	12.0	14.0	25.0 (20.0)
6.6	15.2	24.0	25.0	44.0 (39.5)
11.0	24.0	40.0	39.5	70.0 (66.0)

註 ※商用周波数電圧 $\times \sqrt{2} \times 1.25$ ()の中は制限電圧 $\times 1.65$

一方 P. L. Bellaschi^⑧氏は発電機の固定子線輪の絶縁強度をオ5.12表の如く考えている。オ5.12表のそれぞれの定格電圧に対する試験電圧の絶縁破壊電圧に対する倍率を求めると、オ5.13表の通りで、定格電圧が高い方の倍率が小さくなっている。オ5.7表の結果からは定格電圧により絶縁強度と試験電圧との比は大体一定として結果が示されているので、オ5.12表の線輪絶縁強度の取り方とは異なったものである。

オ5.12表 Generator stator coil ground insulation strength^⑧ (estimated)

Maximum Voltage Class	A. I. E. E. test (KV-RMS)	Insulation Break down (KV-RMS)	Impulse Break down (KV-Crest) (Impulse ratio 1.25) (%)
2500	6	25	44
4500	10	30	53
6900	14.8	35	62
11500	24(i)	40	70
13800	28.6	47	83

(※) $1.5 \times 40 \mu s$ wave

(i) 原本は23となっているが試験電圧が($2E+1$)であるので24となる。原本は誤っているのではないかと思う。

線輪絶縁強度の取り方とは異なったものである。

筆者が取り扱っている各定格電圧の線輪の対地絶縁寸法の対地絶縁を 0.13mm

のマイカテープを $\frac{1}{2}$ 半重巻するとして、その巻回数調べると、オ5.14表の通りである。この表からとオ5.6表の線輪の対地絶縁の破壊電圧とから線輪の

オ5.13表

定格電圧(V)	破壊電圧/試験電圧
2500	4.17
4500	3
6900	2.36
11500	1.67
13800	1.64

絶縁強度は定格電圧に大体比例したものであり、したがって

Bellasi 氏の論文の破壊電圧と試験電圧との比がわが国の線輪と一致しない。

オ5.14表

定格電圧(kV)	絶縁寸法(mm)	巻回数
3.3	2程度	4~5
6.6	3.5程度	7~8
11	4.5~5	11~13

(註) オ1.1表と大体同一である。

以上実験結果に基づいて、いろいろ考察を加え、発電機線輪の絶縁耐力は次のように結論することができる。

- 1 新品発電機線輪の対地絶縁の絶縁耐力はJEC試験電圧 $(2E+2)$ kVの $\frac{1}{6.5}$ 倍である。使用できる線輪の対地絶縁耐力の限界は $(2E+2)$ kVの $\frac{1}{1}$ 倍である。また、衝電波に対しては新品線輪の対地絶縁耐力は回転機用避雷器の制限電圧の $\frac{1}{6.5}$ 倍で、使用できる限界は制限電圧の $\frac{1}{1}$ 倍である。
- 2 新品線輪の巻回数絶縁耐力はB種絶縁では運転中にかかる巻回数電圧に $\sqrt{2} \times 1.25$ を乗じた値の $\frac{1}{20}$ 倍、A種絶縁では $\frac{1}{10}$ 倍と推定する。

5.3 試験電圧の最高値の決定

発電機の衝電圧試験電圧を決定するに当っては、回転機用避雷器の制限電圧をベースとし、それに加えるに接地抵抗による電圧降下、絶縁の劣化による絶縁耐力の低下等を考慮する必要がある。したがって、以下本節においてはこれらの要素を考慮し、発電機衝電圧試験電圧値を求め、オ5.2節で述べた最近製作される発電機線輪の破壊電圧との裕度も調べることにする。

5.3.1 回転機用避雷器について

回転機用避雷器は回転機に侵入する衝電波の波高値をその制限電圧の範囲内に抑制し、回転機の対地絶縁を保護することを主たる目的としたものである。回転機用避雷器の規格は社団法人電気協同研究会主催の発送電荷害防止専門委員会のもとで、昭和25年初頭より慎重なる審議の結果、昭和26年に回転機用避雷器要綱^①を定めた。この要綱による回転機避雷器規格を示すと、オ5.15表の通りである。

近年竣工した丸山発電所 75,000 ㇼVA 発電機の定格電圧は 13.8² ㇼV。工事中の佐久間発電所 93,000 ㇼVA 発電機の定格電圧も 13.8² ㇼV である。このように発電機の定格容量が大型のものになると、自然的見地から定格電圧の高いものが出現する。外国においてはオ 1 章において述べた如く定格電圧が

オ 5.15 表 回転機用避雷器規格一覧表^①

回転機中性点接地方式	公称電圧 (ㇼV)	商用周波許容端子電圧 (実効値 KV)	商用周波数電開始電圧 (実効値 KV)	放電電流 1500A に於ける制限電圧 (KV)	避雷器開始電圧 (試験波形標準値) (KV) *
非接地及び抵抗接地	3.0	4.2 (14E)	6.9 (23E)	12.0	13.0
	6.0	8.4 (〃)	13.8 (〃)	24.0	26.0
	10.0	14.0 (〃)	23.0 (〃)	40.0	43.0
有効接地	3.0	3.3 (〃)	5.4 (18E)	9.5	11.5
	6.0	6.6 (〃)	10.8 (〃)	19.0	21.0
	10.0	11.0 (〃)	18.0 (〃)	32.0	35.0

〔註〕 E は公称電圧 * 試験電圧波形は暫定とする。

13.8、16.5、18、22 ㇼV の発電機が製作されている状態であり、わが国にてもその傾向があるので、取り敢えず 13.8、16.5 ㇼV の定格電圧を考慮しておく必要がある。したがって、回転機用避雷器の公称電圧はオ 5.15 表に示した如く、10 ㇼV 迄しか定めていないので、公称電圧として 12 ㇼV、15 ㇼV を考えることにする。

発電機の中性点接地方式について調べると、わが国の発電機の中性点接地方式は抵抗接地が多く、非接地、計器用変成器接地、最近僅かであるが二次抵抗器付柱上変圧器接地が採用されている。抵抗接地の中性点抵抗値は接地電流を 1000A に抑制するように選定したものが多し。したがってわが国の中性点接地方式は非接地および抵抗接地で殆んど占めていていると考えると差し支えない。それ故に回転機用避雷器は非接地、および抵抗接地のものを採用することになる。非接地および抵抗接地方式に採用する回転機用避雷器の公称電圧 12 ㇼV、

15KV の制限電圧をオ 5.15 表に示した 10 ㇼV 迄の制限電圧の考え方から算き出すと公称電圧 12 ㇼV の回転機用避雷器の制限電圧は 48 ㇼV、15KV のものは 60 ㇼV となる。

参考のため W. H の Station Type (S.V. 型) 回転機用避雷器の規格を示すとオ 5.16 表の通りである。わが国の回転機用避雷器と比べると制限電圧値は低くなっている。

オ 5.16 表 S.V. 型回転機用避雷器^②

中性点接地方式	定格電圧 (KV)	商用周波許容端子電圧 (実効値 KV)	避雷放電開始電圧 (波高値 KV)	1500A における制限電圧 (波高値)
非接地方式および抵抗接地方式	2.4	3.0	9.5	9.0
	4.14	4.5	14.5	13.0
	4.8	6.0	19.0	18.0

中性点接地方式	定格電圧 (KV)	商用周波数許容端子電圧 (実効値KV)	衝撃放電開始電圧 (波高値KV)	1500Aにおける制限電圧 (波高値)
非接地方式および 抵抗接地方式	6.9	7.5	24.0	21.0
	11.5	12.0	37.0	36.0
	13.8	15.0	46.0	45.0
有効接地方式	24	3.0	9.5	9.0
	414	3.0	9.5	9.0
	4.8	4.5	14.5	13.0
	6.9	6.0	19.0	18.0
	11.5	9.0	28.0	27.0
	13.8	12.0	37.0	36.0

5.3.2 接地抵抗による電圧降下と絶縁劣化による絶縁耐力の低下について
 回転機用避雷器要綱によると、接地抵抗が無視できるよう接地は発電機本体にとることが推奨されている。しかし現在の所では回転機用避雷器は発電機よりやや離れた所に設置している。これは避雷器に対する信頼度からくるものであって、避雷器を発電機本体に近くに設置した時、避雷器が爆破した時、発電機自体損傷を蒙ることを避けたいという考え方に基づいている。最近建設される発電所は連接接地を採用していることと、また発電所は、河川の近くにあるので、大体接地抵抗は低い。東京電力 早川オ三発電所 田代オ一発電所および田代オ二発電所において接地抵抗を交流40Aを流して実測した。その結果が表5.17表である。

したがって衝撃波に対する接地抵抗としては最大5Ω程度を考えておけばよいと思う。

表5.17表 発電所の接地抵抗

発電所名	接地抵抗 (Ω)
早川オ三発電所	1.28
田代オ一発電所	1.45
田代オ二発電所	1.27

次に絶縁劣化による絶縁耐力の低下をどの程度見込むかということであるがこれに関して資料は今日ないようである。筆者の研究室では線輪を強制劣化させ、劣化による絶縁耐力の低下について実験中であるが、まだ結論を得るに至っていない。今後の課題であろう。

筆者は一応目安をつけるため絶縁の劣化による絶縁耐力の見込みを制限電圧の10%と考えることにしたい。

5.3.3 試験電圧の決定

試験電圧の決定に必要な要素は次の通りである。

- (i) 回転機用避雷器の制限電圧
- (ii) 接地抵抗による電圧降下 この場合の接地電流は制限電圧が放電電流1500Aで定めている関係上1500Aとする。

- (iii) 絶縁劣化による絶縁耐力の低下の最低の見込を制限電圧の10%
 (iv) 安全率 — 上記3項以外のもので絶縁耐力の急激なる減り 例えは絶縁処理の不十分とか、絶縁仕様の不均一、または過負荷運転、浸水のために絶縁耐力の低下等 — として制限電圧の10%

上記4項について公称電圧別に整理したのがオ5.18表である。

オ 5. 18 表

公称電圧 (tV)	制限電圧 (tV)	接地抵抗 5Ω の 1500A に 対する電圧降下(tV)	絶縁劣化による見込 制限電圧 $\times 0.1$ (tV)	安全率 制限電圧 $\times 0.1$ (tV)	試験電圧(案)
3	12	7.5	1.2	1.2	21.9
6	24	7.5	2.4	2.4	36.3
10	40	7.5	4.0	4.0	55.5
12	48	7.5	4.8	4.8	65.1
15	60	7.5	6.0	6.0	79.5

オ5.18表の内、制限電圧、~~制限電圧~~ 接地抵抗 5Ω の 1500A に対する電圧降下に上記した2項を合計した電圧（一応試験電圧(案)とする）を図示したのがオ5.3図である。さらに新品線輪の衝撃絶縁強度（オ5.2項において検討した結果）— 制限電圧の1.65倍、また交流絶縁耐力では $(2E+2)\text{tV} \times 1.65$ 倍（ E は定格電圧）この電圧に $\sqrt{2} \times 1.25$ （衝撃比）を乗じた値 — をオ5.3図に図示する。試験電圧(案)と制限電圧 $\times 1.65$ とを比較すると公称電圧 6tV 迄の発電機においては後者の方が大きいが、 3tV においては試験電圧(案)の方が高い。

公称電圧 3tV の発電機は発電機電圧で直接配電している場合が多く、電力会社としては 3tV 級の発電機の絶縁を強化するようにとの要望がある。直接発電機電圧で配電しているのは地方配電であり、他に電力の供給源をもたないことを考えると、生活条件として缺くべからざる電燈、家内工業、農事電化を維持する上において、 3tV 級の発電機の絶縁を強化することが必要であろう。したがって 3tV 発電機の衝撃電圧試験電圧値としてはその重要度において区分することとし、 25tV と 20tV とに定めたい。その選定は電力会社において行うべきであると考える。

公称電圧 6tV 以上は試験電圧(案)が衝撃絶縁強度との間にオ5.19表に示す裕度をもっているので、試験電圧(案)の数値を整理して、試験電圧をオ5.

オ5. 19 表

公称電圧 (tV)	制限電圧 $\times 1.65$ — 試験電圧(案) (tV)
3	— 2.1 (19.8 — 21.9)
6	3.3 (39.6 — 36.3)
10	10.5 (66.0 — 55.5)
12	14.1 (79.2 — 65.1)
15	19.5 (99.0 — 79.5)

20表の如く定めるのが
 発電機の運転保守上 妥当
 と考える。

(註) ()内は制限電圧 $\times 1.65$ — 試験電圧(案)

オ5.20表 試験電圧

公称電圧 (kV)	試験電圧 (kV)
3	25 (20)
6	35
10	55
12	65
15	80

(註) () は重要度の低い場合の試験電圧

なおオ5.3節に制限電圧と $(2E+2) \times \sqrt{2} \times 1.25$ の比較 オ5.2節において旧品(廃品)線輪の衝撃絶縁強度は制限電圧の1/1倍なることを述べたが、その電圧と、同様に交流絶縁耐力としての $(2E+2) \times \sqrt{2} \times 1.25 \times 1/1$ を比較のため図示しておいた。

オ5.4 試験波形

本章の緒言において、線輪が固定子に組線された発電機巻線の巻回間の絶縁の絶縁強度を確かめるには衝撃電圧試験によるのが最も実行容易で合理的であることを述べた。しからは発電機衝撃電圧試験に使用する波形をどのように選定することが最も合理的であるかを検討してみたい。

まず巻回間絶縁の絶縁強度を考える場合の基準としては下記のもので考えられる。

(1) 常時運転中にかかる巻回間電圧

(2) オ5.2節において述べた、旧品発電機の巻回間絶縁耐力は運転中にかかる巻回間電圧に $(\sqrt{2} \times 1.25)$ を乗じた値より40倍以上であることが必要である。

(3) オ5.2表の旧品発電機の巻回間絶縁の破壊電圧値を、オ5.20表の試験電圧に換算した時の被頭長

5.4.1 常時運転中にかかる巻回間電圧を基準とした被頭長

巻回間絶縁は線輪の心線に接している。心線の温度は線輪と線輪との間の温度(発電機の温度は素内の線輪と線輪の間にサーモカップルまたはサーチ、コイルを挿入して測定している)より定格電流において約10℃高いので、巻回間絶縁の劣化は対地絶縁より熱的劣化は着しい。したがって、巻回間の絶縁に使用する材料は今後耐熱性のものが必要であると共に絶縁は一段と強化しておくべきである。その強化の目安として、 $2E$ の面用因数被頭数絶縁耐力試験電圧 $(2E+1000)$ (先には $(2E+2000)$ としたがここでは $(2E+1000)$ とする)を借用して巻回間絶縁の保証絶縁耐力 L_0 は(3.1)式の如くにとるすなわち

$$L_0 = (2E + 1000) \times \sqrt{2} \times 1.25 \quad \text{----- (3.1)}$$

ただし E は常時運転中にかかる巻回間電圧、 1.25 は衝撃比

(3.1)式中 1000V は巻回間絶縁の劣化、その他を見込んだ値となる。
 発電機の巻回間電圧はオ5.4表、オ5.8表に示した値であって、大体において
 100V以下であるので、巻回間電圧を100Vとし、巻回間衝撃絶縁強度を
 (3.1)式から求めると約2,100Vとなる。巻回間にかかる電圧を試験電
 圧の6%とし、2,100Vとの比を求めたのがオ5.21表である。その結果、

オ5.21表

公称電圧 (kV)	試験電圧 (kV)	試験電圧の6% (kV)	試験電圧6% 21kV
3	25(20)	1.5	0.715
6	35	2.1	1
10	55	3.3	1.57
12	65	3.9	1.86
15	80	4.8	2.28

公称電圧6kV以下
 においては巻回間の
 絶縁を21kVに耐
 えるように設計して
 おけば十分である。
 公称電圧10、12
 および15kVにお
 いては21kV以上

の電圧に耐えるよう設計する必要がある。定格電圧の高い発電機は大体容量の
 大きい発電機となるので、試験電圧の6%に巻回間の絶縁を施すことは困難と
 は考えられない。この点についてはオ5.4.4項において検討する。

巻回間電圧にかかる最大電圧を試験電圧の6%とした時の被覆長はオ4.44図
 より3msとなる。

5.4.2 旧品発電機の運転中にかかる巻回間電圧に $(\sqrt{2} \times 1.25 \times 40)$ を
 乗じた値が巻回間絶縁の保証耐力とした時のオ4.44図曲線より求めた試験電
 圧に対する被覆長オ5.4表に掲げた衝撃電圧試験で破壊した巻回間の電圧の運
 転時にかかる巻回間電圧の $(\sqrt{2} \times 1.25)$ したものに対する比をとった結果、
 巻回間の絶縁は運転時の巻回間電圧に $(\sqrt{2} \times 1.25)$ を乗じた絶縁耐力を有する

オ5.22表

容量 (kVA)	定格電圧 (kV)	巻回間電圧 (V)	$(\sqrt{2} \times 1.25 \times 50)E$	試験電圧に対する%	オ4.44図の被覆長 (ms)
4,375	10	21	1590	2.9	2.5
25,000	11	24.2	5960	10.9	1.0以下
1,000	11	18.5	1320	2.4	2.7
11,000	11	26.4	1870	3.4	3.5
4,375	6.6	35.5	2520	7.0	2.5
4,800	6.6	43.3	3060	8.75	1.0以下
1,500	6.6	19.8	1400	4.0	2.0
400	3.45	28	550	2.2 (2.75)	1.8 (1.0)
4,500	3.5	15.2	1080	4.32 (5.4)	3.1 (2.5)

ことが見方によれば必要条件となる。それ故にそれだけの絶縁耐力があるかど
 うかを衝撃電圧試験で験するためにはオ5.20表の試験電圧における被覆長はオ
 5.22表に示したものであることが必要となる。

この表から 波頭長は最大 $3.5 \mu s$ でそれより短いものであることがわかる。

5.4.3 オ5.2表の巻回間絶縁破壊電圧とオ5.20表の試験電圧を印加した時の破壊となるような波頭長

オ5.2表の衝撃電圧試験の結果巻回間電圧が破壊した時の巻回間破壊電圧がオ5.20表の試験電圧を印加した時、巻回間にかかるような波頭長はオ5.23表に示す通りである。この表から波頭長が前述した結果より長い。波頭長が長い

オ5.23表

定格電圧 (μV)	発電機容量 (kVA)	オ5.2表の巻回間破壊電圧とオ5.20 表の試験電圧に対する波頭長 (μs)
12	4.375	3.8
11	25.000	1.9
11	1.000	4.8
6.6	4.800	4.5
6.6	4.375	3.5

ことはその発電機の巻回間絶縁耐力が極めて低いことを示すものである。またオ5.23表の発電機の絶縁は本章の諸言に迎えた通り、寿命がまだものであるため、

新設の発電機に対する巻回間絶縁はこれ以上に保証する必要がある。

したがって筆者は本節で迎えた前二項を加味して試験波形の波頭長は試験時の波頭調整をも考慮し、 $3 \sim 3.5 \mu s$ とすべきであることを提案する。

5.4.4 巻回間絶縁寸法に対する検討^⑧

オ5.20表の試験電圧で波頭長を $3 \mu s$ とした時の巻回間絶縁寸法に及ぼす影響について検討してみたい。

巻回間絶縁に使用する材料ならびに処理は 厚さ $0.13 mm$ のマイカテープを $1/2$ ラップ巻とし、コンパウンドを含有し、成形している。 $0.13 mm$ マイカテープの A.C 耐圧はオ5.2表に示した如く $900 V$ であるので、衝撃比を 1.25 とし、衝撃絶縁耐力は次の如くなる。すなわち

$$900 V \times \sqrt{2} \times 1.25 = 1570 V$$

巻回間電圧 $2100 V$ 、 $6500 V$ 、 $7700 V$ に対する絶縁寸法とその裕度を検討してみるとオ5.24表に示す通りである。

オ5.24表^⑧

	2100 V	6500 V	7700 V
絶縁寸法 (mm)	$0.13 mm \times 2^* \times 2 \text{ 回} = 0.52 mm$	$0.13 mm \times 2^* \times 6 \text{ 回} = 1.56 mm$	$0.13 mm \times 2^* \times 8 \text{ 回} = 2.08 mm$
衝撃絶縁耐力 (V)	$1570 V \times 2 \times 0.8^i = 5000 V$	$1570 V \times 2 \times 1 \text{ 回} \times 0.8^i = 15000 V$	$1570 V \times 2 \times 8 \text{ 回} \times 0.7^i = 17500 V$
裕 度	$5000 V \div 2100 V = 2.38$	$15000 V \div 6500 V = 2.31$	$17500 V \div 7700 V = 2.27$

〔註〕※の2は $1/2$ ラップ巻であるので層数は2倍となるため

i は絶縁耐力の減少に対する係数として考えたもの（実際はコンパウンド処理をすることで2倍以上の耐力を有することになる）

マイカテープの絶縁耐力は JIS の規格を参照したのであるが、マイカテープ

(厚さの $1/3 \text{ mm}$) を $1/2$ ラツプ巻 1 巻を施行し、真空処理の上コンパウンドを合浸せしめた巻回間絶縁は衝電圧 10 kV 以上の耐力をもっているから、オ 5.24 表の裕度はさらに 2 倍以上あるものと考えられる。尚題はマイカテープの厚みはオ 1.2 表に示した如く、その厚みが均一でない所にあるので、新しいうちには絶縁耐力が十分あっても、合浸剤の劣化および振動等の機械的応力により巻回間の絶縁耐力が急激に低下することは考えられる。

巻回間の絶縁は導線を $1/2$ ラツプ巻して施行するので、巻回間は実は 2 倍の絶縁寸法を有し、絶縁耐力も 2 倍となる。それ故にオ 5.24 表より $1/3 \text{ mm}$ マイカテープを $1/2$ ラツプ巻 2 回した場合は巻回間の寸法 10.4 mm は $\approx 0.52 \times 20$ 、絶縁耐力は 10 kV となる。したがって実際の絶縁耐力はさらに 2 倍程度はあるので、一般の発電機ではこの程度の巻回間の絶縁で十分である。特に巻回間の絶縁強度の高い発電機は大型機で、巻回数が多いものであり、構造上より巻回間の絶縁寸法は幾分大きくとることもできる。

以上述べたことより波頭を $3 \mu\text{s}$ に選定しても従来の絶縁寸法と大差がない。

5.4.5 波尾長について

試験波形の波尾長は JEC-106 (1944) 衝電圧試験において定められた波尾長 $40 \mu\text{s}$ を採用することにした。変圧器を通して発電機に侵入する進行波は長波尾長であるが、発電機の衝電圧試験においてはオ 5.5 節に述べる如く終端を接地あるいは低抵抗を以って接地すること、巻線を往復するに要する時間は $20 \sim 30 \mu\text{s}$ であることから、巻線の対地電圧は波尾長 $40 \mu\text{s}$ になった時、さらに長波尾長にした時とでは殆んど変わらないので、JEC-106 の規格に定められた $40 \mu\text{s}$ を採用した。

波尾長の裕度は試験実施上たいした支障が伴わないので、実施上の困難を考慮して、なるべく試験電圧波形に近い波形を使用することとし、JEC-106 の規格に準ずることとした。

衝電圧試験に使用する試験電圧波形の極性を正極性と定めたがこれに対して絶対的の理由はなく、極性に対する検討が不十分であるので、本規格としては変圧器衝電圧試験の極性と歩調を合わせるために正極性を採用したにすぎない。

以上述べた結論として試験波形は $(1.3 \times 40) \mu\text{s}$ とし、波頭長の裕度は $3 \sim 3.5 \mu\text{s}$ とする。

5.5 衝電圧試験について

衝電圧試験の実施に当って衝電圧の波高値の認定と試験の要領とが問題になるので下記の如く行うのが最も妥当と考える。

5.5.1 衝電圧波高値の認定

衝電圧発生器の充電電圧と発生電圧とが直線的な関係にあると認められる場合には、試験電圧波高値の 50% 程度の低減電圧における測定値を直線的に

延長して外挿法により充電電圧を求めればよい。

直線的関係が不確実な場合にはまず試験電圧波高値の $\frac{1}{2}$ 以上の低減電圧において衝電電圧発生器に供試験電機を接続してその端子電圧波高値 E を測定し、つぎに衝電電圧発生器の回路定数を不変のまま充電電圧を充電電圧のままで試験電機を取除いた時の発生電圧波高値 E_0 を測定する。供試験電機に印加する試験電圧波高値を E とすれば、試験電機を接続した場合に波高値 E なる電圧を手えるような無負荷電圧波高値 E_0 は衝電電圧発生器の電圧変動率が充電電圧の大きさにより変化しないものと見なし、次式により求められる。

$$E_0 = E \times \frac{E_0'}{E'}$$

この波高値 E_0 に対する衝電電圧発生器の充電電圧を求め、この充電電圧において回路定数を不変のまま試験電機を接続して衝電電圧波を発生せしめるとその波高値は求める試験電圧波高値 E と見なされる。

5.5.2 試験の要領

発電機の衝電電圧試験はその絶縁が所定の絶縁程度を有しているかを確かめるために行うものである。巻線の印加端子に対する他端子を開放していると開放端電圧は印加電圧の約1.8倍に上昇するので開放端側の線輪は所定の試験より苛酷なものとなるため、他端子は直接接地するか、または供試巻線の移動抵抗より低い抵抗を通して接地して試験を行なわなければならない。

二重以上の巻線を有する発電機は一相ごとに衝電電圧試験を実施するのが、巻回間絶縁の破損の検出を確実にする上から有効である。この場合電圧を印加しない他の二相の巻線の両端または一端子を接地しておく場合は開放端子にかなりの電圧が誘起されるので、これを抑制するためと検出を容易にするため一端子は接地し、他端子は低抵抗を通して接地することが好ましい。一重Y巻線の発電機に対しては三相同時に電圧を印加して、試験するのが検出法に平衡法を適用することができるので、その点有利である。

発電機巻線の線輪巻回間分担電圧は印加端子に近い線輪において高く接地端に近い線輪の巻回間分担電圧は小さい。また線輪の対地電圧は巻線の中程の線輪において端子電圧の約80%位で接地端に近い線輪ほどその対地電圧は低下するので、接地端より再度電圧を印加して、所定の基準絶縁程度を有するかを確かめるために、巻線の出力端子、中性点よりそれぞれ各一回あて所定の試験電圧を印加して絶縁が破損しないことを確かめなければならない。

試験に際して回転子が組立てられた状態で電圧を印加すると、制動巻線がない機械では回転子巻線の端子間および対地間にかかなり高い電圧が誘起され、回転子巻線の絶縁を痛めるおそれがあるので回転子も取出した状態で試験を行うのが好ましい。またこの方が検出法の取りつけの便利と破損線輪の取り替えさらには破損箇所の検出には有利である。回転子が挿入されている状態で試験を行う場合は回転子巻線の端子を短絡接地しなければならない。なお温度測定用

サーチコイル端子はその端子間に電圧が誘起するのを防ぐため短絡接地しておかなければならない。

凸極機の場合は回転子が有る場合と無い場合とでは巻回間分担電圧はたいした相違はない。

§5.6 結 言

以上述べたことを要約すると次の通りである。

1. 線輪を全巻巻する発電機の対地絶縁の絶縁耐力は

(1) 商用周波 $(2E+2)$ kV の $1/1$ 倍

(2) 衝撃電圧 $---$ 回転機用避雷器の制限電圧の $1/1$ 倍

で、巻回間絶縁耐力は、運転中にかかる巻回間電圧に $\sqrt{2} \times 1.25$ を乗じた値の 40 倍である。

2. 新品線輪の対地絶縁強度は

商用周波に対しては $(2E+2)$ kV の $1/6.5$ 倍

衝撃波に対しては 回転機用避雷器制限電圧の $1/6.5$ 倍

である。

3. 新品線輪の巻回間絶縁の絶縁強度は

A 種絶縁においては巻回間電圧に $(\sqrt{2} \times 1.25)$ を乗じた値の 100 倍

B 種絶縁 11 200 倍

である。

4. 発電機に対する衝撃電圧試験の試験電圧は表 5.26 表の通りにする。すなわち

公称電圧 (kV)	試験電圧 (kV)
3	25 (20)
6	35
10	55
12	65
15	80

5. 試験波形の波頭長は試験時の波頭の調整を考慮し、 $3 \sim 3.5 \mu s$ に選定することが今日の発電機の巻回間絶縁強度を強化する上において必要である。

6. したがって試験波形は $(3 \times 40) \mu s$ とし、波頭長の裕度を $3 \sim 3.5 \mu s$ とする。

7. 今後の問題としては発電機絶縁の劣化に対する絶縁耐力の低下についてはつきりさせて行く必要がある。

180 頃欠

第6章 発電機巻線の故障検出

第6章 發電機巻線の故障検出

§ 6.1 結 言

発電機の衝撃電圧試験において、絶縁の破壊を的確に検出しうることは、さらには絶縁が破壊した個所を摘出することが要求される。発電機巻線の絶縁に関しては第1章において述べた如く、主として対地絶縁および巻回間絶縁とがある。対地絶縁の破壊は高速度ブラウン管、観測または撮影において印加波形が截断波となることから、容易に検出することができるし、破壊個所の摘出は、やや面倒ではあるが可能である。問題となるのは巻回間の絶縁破壊の検出である。

変圧器の衝撃電圧試験はJEC 110規定が制定されて、今日立多数の変圧器が試験されて来たが、巻回間の絶縁破壊の検出はなお問題となっている。変圧器巻線の巻回間絶縁の破壊の検出は多くの研究者によって研究されている。今日迄発表されている検出法には、三浦氏の平衡法^①、森氏の電流法^②、さらに、毛利氏の電流法^③があり、短絡を検出しうる能力は、巻回間の0.1%程度のものである。したがって巻回数が多い変圧器の1巻回間の短絡を検出することは極めて困難である。

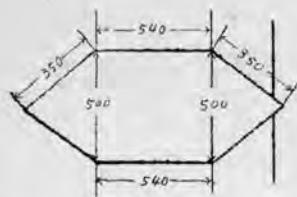
本章では 発電機巻線の巻回間絶縁の破壊の検出について述べることにする。第6.2節において巻線の巻回間を短絡した時の巻線の漏洩インダクタンスの減少、第6.3節において短絡による過渡波動インピーダンスを測定し、短絡による巻線の波動インピーダンスが減少することを確認する。さらに短絡による巻線の線輪対地電圧および接地電流の変化を実験的に確かめたのでその結果を述べ、第6.4節において巻回間短絡の検出の原理とその方法について、第6.5節において実際の発電機に適用した例について説明する。

§ 6.2 線輪および巻回間の短絡による巻線の 漏洩インダクタンスの減少について

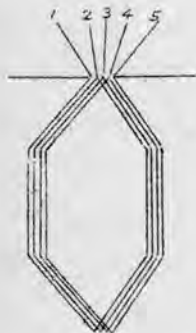
発電機線輪1本の漏洩インダクタンスについて、第1章第1.2.3項に実測結果を述べたが、本節では巻線および線輪の漏洩インダクタンスが線輪1本或いは7ターンを短絡した時の漏洩インダクタンスの減少について述べる。実測に使用したのは、横河製BV-Z-103A万能ブリッジに横河製選圧増巾巻(DV-CR-201)を併用して増巾感度上げて測定した。発信器の周波数は1,000Hzである。

6.2.1 線輪および巻回間短絡による漏洩インダクタンスの減少

まず線輪1本、線輪3本を組合した時、巻回間を短絡して漏洩インダクタンスの減少を線輪が鉄心に入っていない状態で測定した。供試線輪の寸法は第6.1図に示す通りで、巻回数は4ターンである。



第6.1図 供試線輪の寸法



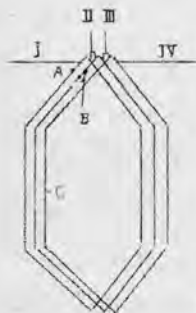
第6.2図

(1) 線輪1本の場合

線輪1本の線輪端の絶縁の一部をけづりとり、巻回間の短絡を行った、線輪1本の巻回線と短絡点を示したのが、第6.2図である。

短絡した結果は第6.2図に附記している通りで、1ターン短絡で漏洩インダクタンスは12~14 μH の減少となる、線輪の内部にある巻回間を短絡したときの方が外部に近い巻回間を短絡した時より漏洩インダクタンスの減少が大きい。

(2) 線輪3本を重ね巻にした場合の短絡による漏洩インダクタンスの減少



第6.3図 3本重ね巻

3本の線輪重ね巻配列
全インダクタンス 165 μH
I-II 短絡(線輪1本) 52 μH
II-III 〃(〃) 32 μH

線輪3本を第6.3図の如く重ね巻として配置した場合の短絡による漏洩インダクタンスの減少は下記の通りである。

(i) 線輪1本を短絡した時、全インダクタンス165 μH が52 μH (第6.3図 1, 2端子短絡), 32 μH (2, 3端子短絡), となり113 μH , 133 μH の減少となる。

(ii) 第6.3図の線輪配置において、A線輪の1, 2端子(第6.2図参照)短絡したときのインダクタンスは110 μH (減少は55 μH)、2, 3端子を短絡した時は98 μH (67 μH の減少)、B線輪の1, 2端子を短絡したときは52 μH (113 μH の減少)、2, 3端子を短絡した時は52 μH (113 μH の減少)である。

6.2.2 40 kVA (3.3 kV) 発電機の巻線の漏洩インダクタンス

当該発電機の線輪配置は、第1章第1.44図に掲示しているので参照されたい。実測より求めた発電機巻線の自己インダクタンス、相互インダクタンスは、第6.1表の通りである。

さらに鉄心中のV相巻線の線輪1本の漏洩インダクタンスは1.3 mHである。測定時の他相巻線は開放状態である。第6.1表自己インピーダンスより線輪1本のインダクタンスを求めると、他相開放の時が約2.6 mH、接地の時は1.67 mH

第6.1表 40kVA巻線インダクタンス

	供相 試	測定値 (mH)	他相の 状態
自己 インダク タンス	U	63	開 放
	V	〃	〃
	W	〃	〃
	U	40	接 地
	V	〃	〃
	W	〃	〃
相互 インダ クタンス	三相一括	6.4	
	U-V	22	
	V-W	〃	
	W-U	〃	

(註) 開放は両端子を開放
接地は両端子を接地

第6.2表

	供相 試	測定値 (mH)	他相の 状態
自己 インダク タンス	U	24	開 放
	V	〃	〃
	W	〃	〃
	U	21	接 地
	V	〃	〃
	W	〃	〃
相互 インダ クタンス	U-V	5.5	

た時は他相巻線は対地電位にあるものとして無視することができる。

40kVA発電機においては、V相巻線中の出力端子より第8番目と第9番目との線輪を短絡した。その結果は第6.3表の通りである。さらに各相巻線を、12本にした時の線輪1本を短絡した結果を第6.4表に示す。

第6.3表 (各相巻線24本)

短絡線輪	インダクタンス (mH)	他相の状態
出力端子より8番目	58	開 放
〃 9 〃	〃	〃
〃 8 〃	38	接 地
〃 9 〃	〃	〃

第6.4表 (各相巻線12本)

短絡線輪	インダクタンス (mH)	他相の状態
出力端子より8番目	20	開 放
〃	18	接 地

第6.1表と第6.3表から、線輪1本を短絡したための漏洩インダクタンスの減少は他相巻線開放では $63\text{mH} - 58\text{mH} = 5\text{mH}$ 、他相巻線の両端子を接地した

であり、前者は同相と他相線輪よりの相互誘導、後者は同相線輪よりの相互誘導があるためである。

第6.1表は40kVA、各相24本の線輪が配置された場合のインダクタンスであるが、各相を半分の12本の線輪とした場合(出力端子より各相12本について実測、残りの各相12本の線輪の巻線は一端子を接地、他端子を開放したる状態)の測定結果を第6.2表に示す。

第6.1表と第6.2表の内、他相巻線を開放した状態において、24本の巻線のインダクタンスは63mH、12本の時は24mHである。1相分の巻線が、半分の折返して巻いてない場合を考えると12本の場合のインダクタンスの2倍となり、48mHとなる。同様に他相巻線を接地した時は、 $21\text{mH} \times 2 = 42\text{mH}$ となり、第6.1表の40mHと大体一致する。

$63\text{mH} - 40\text{mH} = 23\text{mH}$ は他相巻線があるための相互誘導が加つたものである。他相巻線の一端或は他端を接地し

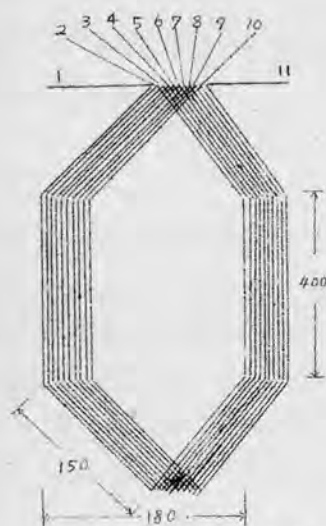
時は $40\text{ mH} - 38\text{ mH} = 2\text{ mH}$ の減少となっている。また短絡線輪の位置を変えても漏洩インダクタンスの減少は変わらない。

第6.2表と第6.4表から、他相巻線を開放した状態における線輪1本の短絡による漏洩インダクタンスの減少は $24\text{ mH} - 20\text{ mH} = 4\text{ mH}$ 、他相巻線の両端を接地した時は $21\text{ mH} - 18\text{ mH} = 3\text{ mH}$ の減少となっている。

6.2.3 考察

巻回数、線輪1本を短絡した時の線輪および巻線の漏洩インダクタンスの減少の割合を実測したが、その結果を纏めると次の通りである。

i 線輪1本の漏洩インダクタンスは1ターンを短絡することにより約半分に減少する。供試線輪は巻回数が4回であるが、第6.4図に示した巻回数10回の線輪の1ターンを短絡した時の漏洩インダクタンスの減少は第6.5表に示す通りであつて、線輪の漏洩インダクタンスは1ターンにより約半分に減少すると考えられる。

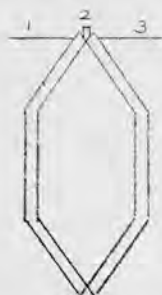


第6.4図 10ターンの線輪

第6.5表 10ターンの線輪のインダクタンス

短絡箇所	短絡巻回数	測定インダクタンス(μH)	減少したインダクタンス(μH)
建 全	0	80	0
1-2	1	46	34
5-6	1	39	41
1-3	2	32	48
1-4	3	24	56
1-5	4	19	61
1-6	5	14	66
1-7	6	10	70

ii 線輪3本を重ね巻にすると線輪には相互インダクタンスが加わつて、線輪3本の全漏洩インダクタンスは増加する。今線輪2本(第6.1図と同一線輪)を第6.5図の通り重ねて置いた、線輪2本の全漏洩インダクタンスは $83\mu\text{H}$ で、2本の線輪間の相互インダクタンスは $15.5\mu\text{H} \sim 16\mu\text{H}$ である。さらに、



第6.5図 線輪2本の配置

線輪2本

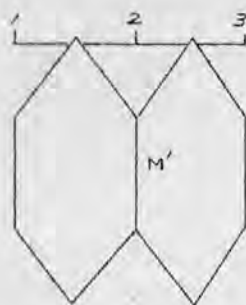
1-2-3と接続した時 1-3間 $83\mu\text{H}$

1-3-2と 〃 1-2間 $18\mu\text{H}$

$L + L + 2M = 83\mu\text{H}$ $M = 15.5\mu\text{H}$

$L + L - 2M = 18\mu\text{H}$ $M = 16\mu\text{H}$

第6.6図の如く線輪導線を固定子溝に納まっている状態における2本の線輪の全漏洩インダクタンスは線輪配置が1-2-3の時(第6.6図参照) $44\mu\text{H}$ 、1-3-2の配置の時は $61\mu\text{H}$ である。この時の



第6.6図 溝部を溝の方向に重ねた線輪配置

$$\begin{aligned}
 1-2-3 &= 44\mu\text{H} \\
 2L-2M' &= 44\mu\text{H} \\
 M' &= 4\mu\text{H} \\
 1-3-2 & \\
 2L+2M' &= 61\mu\text{H} \\
 M' &= 4.5\mu\text{H}
 \end{aligned}$$

相互インダクタンスは $4 \sim 4.5\mu\text{H}$ である。したがって線輪1本のインダクタンスは自己インダクタンスに、他の2本の線輪より相互インダクタンスが加わった値となる。今相互インダクタンスが各線輪に同一作用をするとすると、3本の線輪の漏洩インダクタンスは

$$3(26+15+15) = 168\mu\text{H} \text{ となり}$$

大体測定値と一致する。

- iii 3本の線輪を重ね巻にした場合——毎極毎相の溝数3の重ね巻に相当する——においてA線輪のノターン短絡による漏洩インダクタンスの減少はA線輪を短絡した時の減少の50%以上である。B線輪においてはノターン短絡によりB線輪を短絡した時の85%の漏洩インダクタンスの減少となる。したがって、第6.3図の線輪配置におけるノターン短絡による漏洩インダクタンスの減少は線輪1本を短絡した時の漏洩インダクタンスの50%より85%位の割合となる。

- iv 40kVA発電機巻線のインダクタンスは損失の平衡が不十分のまま測定した。しかし測定した結果一応の目安が得られた。24本の場合、他相巻線を開放した時の巻線のインダクタンスは、線輪1本の短絡により7.9%の減少、他相巻線を接地した状態では5.0%の減少、さらに12本の場合は他相巻線を開放した状態で16.6%、他相を接地した状態で14.3%のインダクタンスの減少となっている。

- v 以上考察した結論として、巻線中線輪の短絡による漏洩インダクタンスの減少は、その線輪に鎖交している磁束と、その線輪から他の線輪に鎖交している磁束の消滅によるものである。また巻回数ノ回を短絡した時の漏洩インダクタンスの減少は巻線中においては線輪1本を短絡した場合の50%～80%程度以上であると考える。

なお短絡による漏洩インダクタンスの減少の割合は、線輪の配置状態、すなわち巻線方式により異なってくる。それ故に検出感度にも影響して来る。

§ 6.3 線輪の短絡が過渡波動インピーダンス巻線対地電圧および接地電流に与える影響について

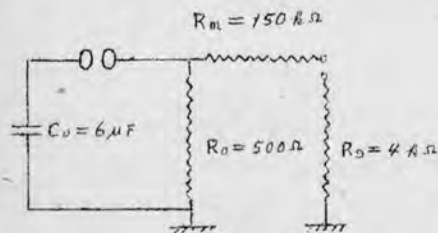
線輪1本を短絡した時の過渡波動インピーダンス、巻線対地電圧および接地電流に与える影響について、3.3kV、40kVA発電機にて実験的に求めた。

6.3.1 過渡波動インピーダンスに及ぼす影響

過渡波動インピーダンスは第二京大法により測定した。測定回路の定数は第6.7図の通りである。

(1) 各相巻線の線輪数24本の場合

試験ケースPにおいて、V相巻線の出力端子より2番目、5番目、8番目、11番目および15番目の線輪を短絡した時のV相巻線の過渡波動インピー



第6.7図

第6.6表 短絡による波動インピーダンス伝播速度の変化

短絡線輪 No.	波動インピーダンス (Ω)	巻線を往復するに 要する時間(μs)
0	3240	25.5
5	3150	22.5
8	3000	"
11	2900	"
15	3060	"

ダンスを測定したのが第6.8図である。このオシログラムから線輪短絡による巻線の漏洩インダクタンスの減少から来る、波動インピーダンスの減少が^{わかる}見える。短絡による過渡波動インピーダンスの変化をわかり易くしたのが、第6.9図である。

このオシログラムより線輪ノ本を短絡すると過渡波動インピーダンス波形に差を生じ、全体の波動インピーダンスは減少し波頭の伝播速度は速くなる。第6.8図より波頭の波動インピーダンス、伝播速度を求めると第6.6表の通りである。

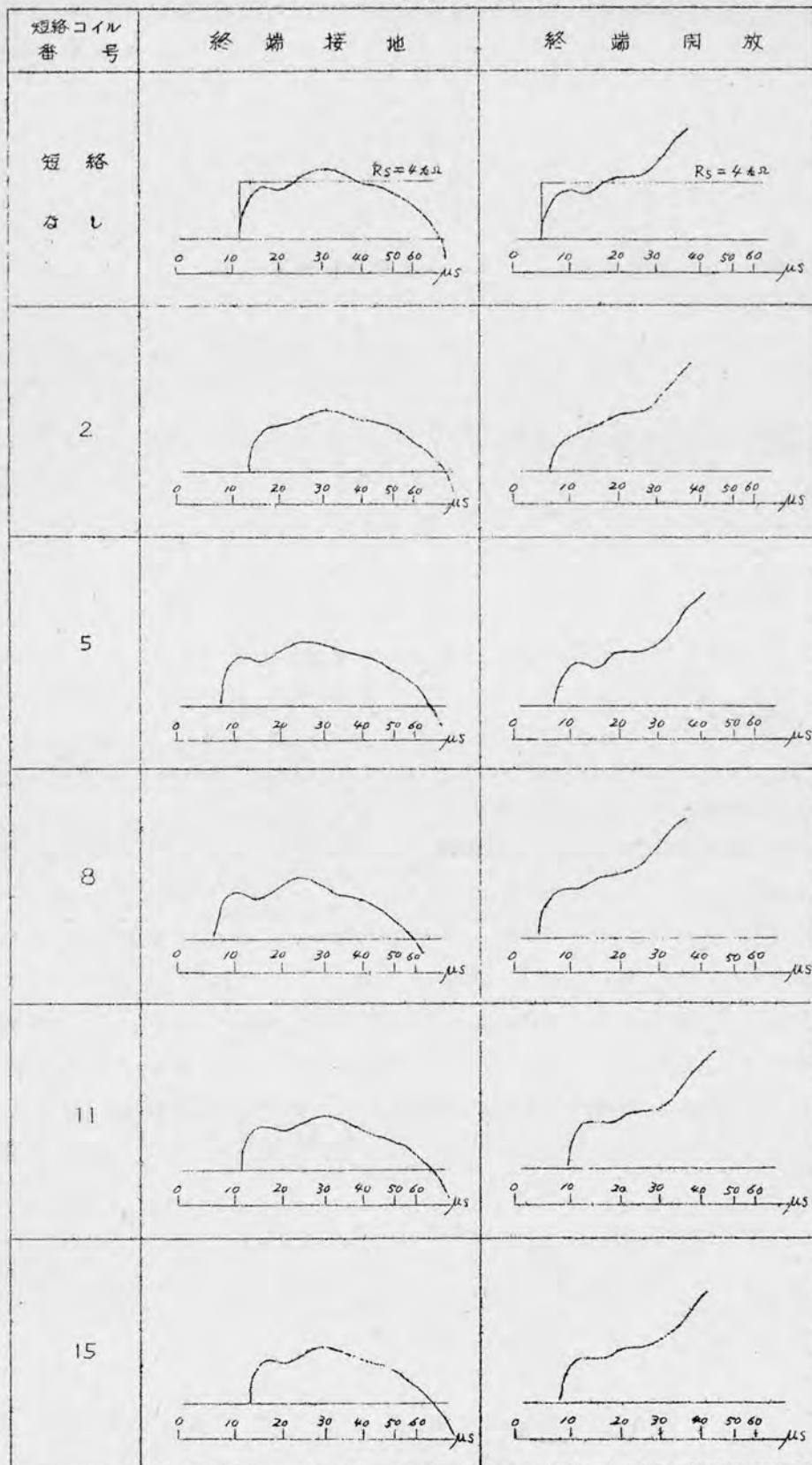
V相巻線は24本の線輪から構成されている。したがって、短絡による巻線内の鎖交磁束の変化がない場合は、その線輪の互長だけ巻線の互長は減少するので、巻線の往復に要する伝播時間は

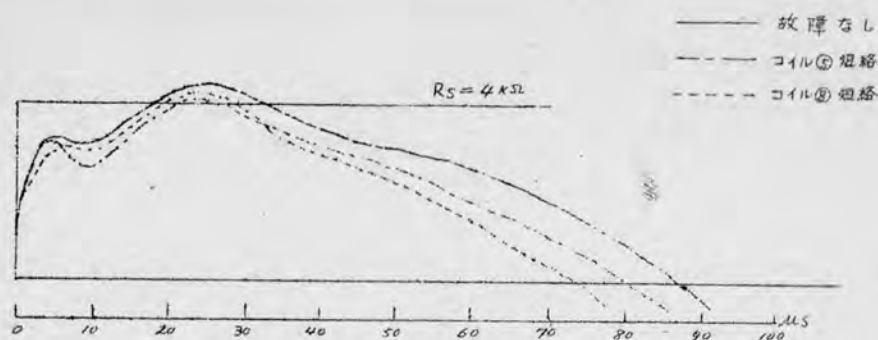
$$(25.5 - \frac{25.5}{24}) \mu s \div 24.4 \mu s \quad \text{となる。}$$

しかし実測結果は第6.6表に示す通り22.5 μs であるので、短絡により約2 μs 、時間が短縮される。

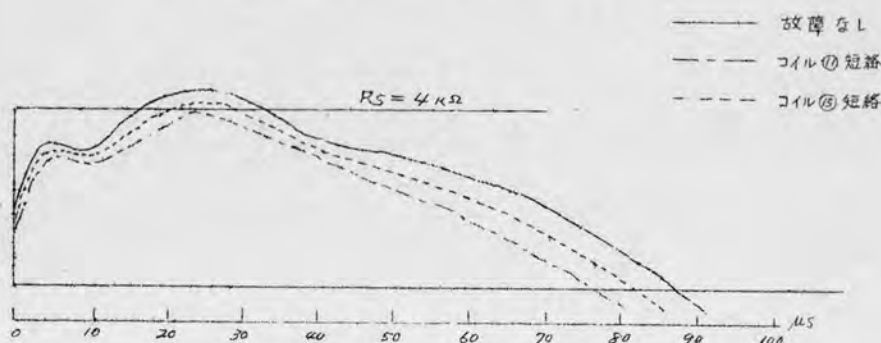
第 6.8 図 線 輪ノ本を短絡した時のV相巻線の過渡波動インピーダンス

(試験ケースP)





(a) V相の出力端子より5番目, 8番目を短絡



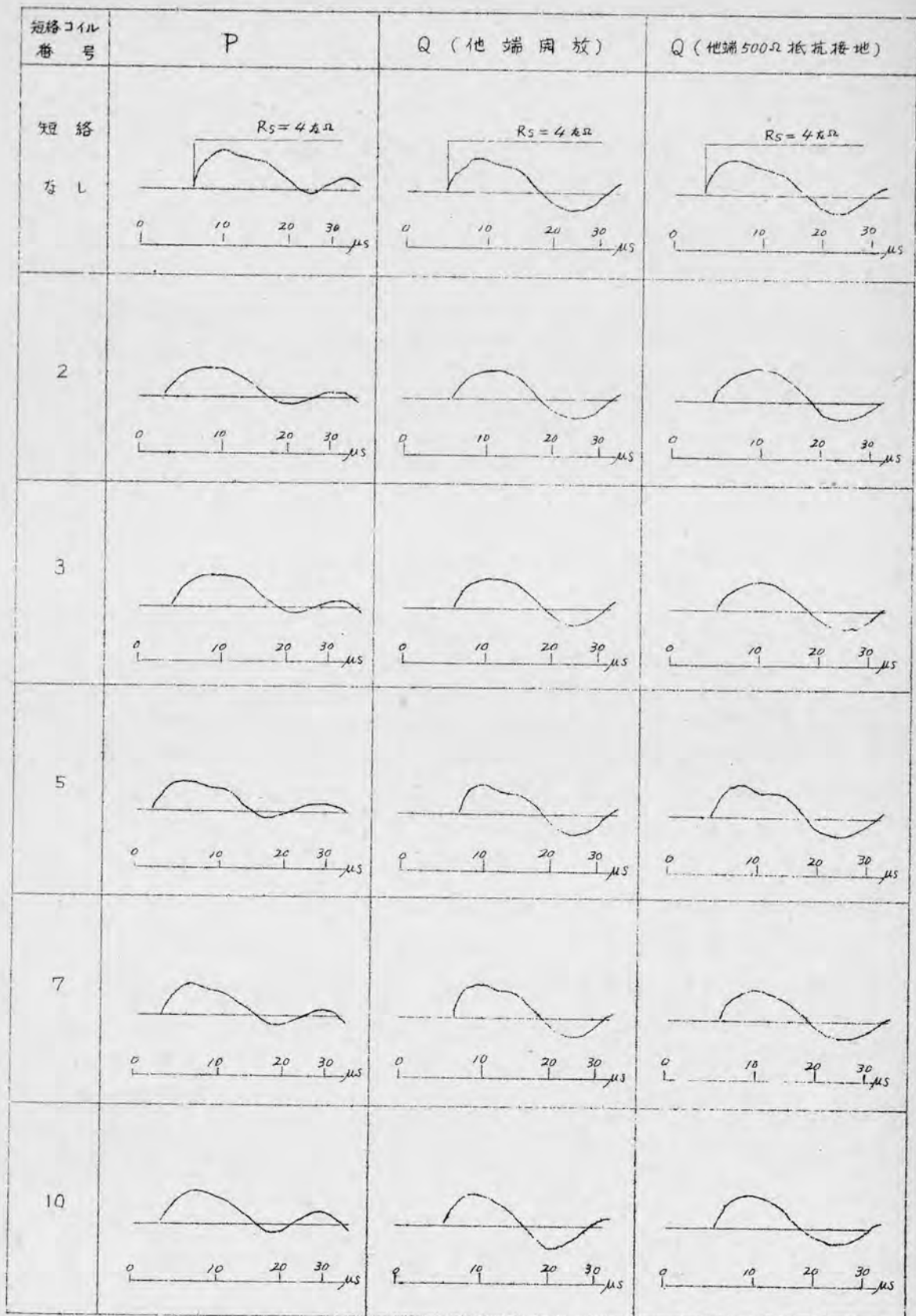
(b) V相の出力端子より11番目, 15番目を短絡

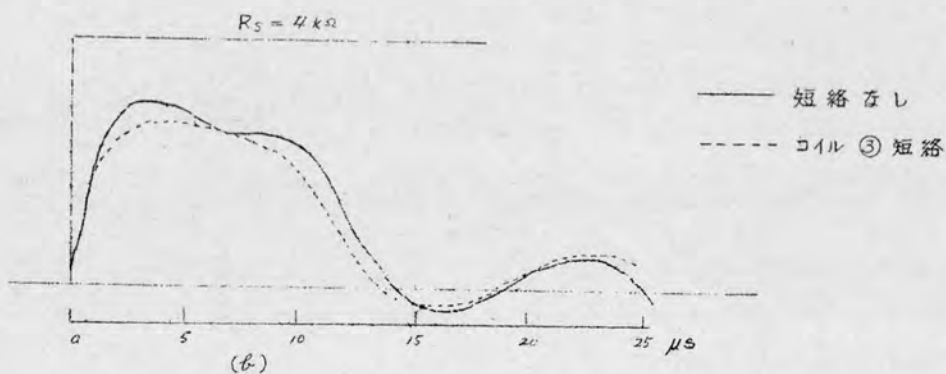
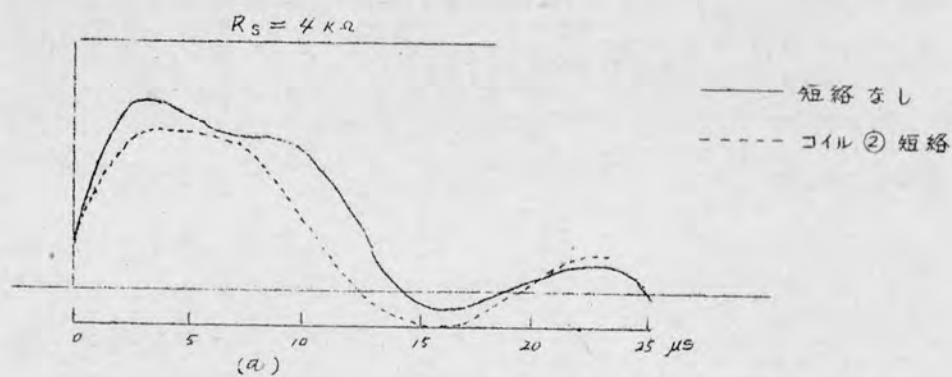
第6.9回

(2) 巻線の線輪数が12本の場合

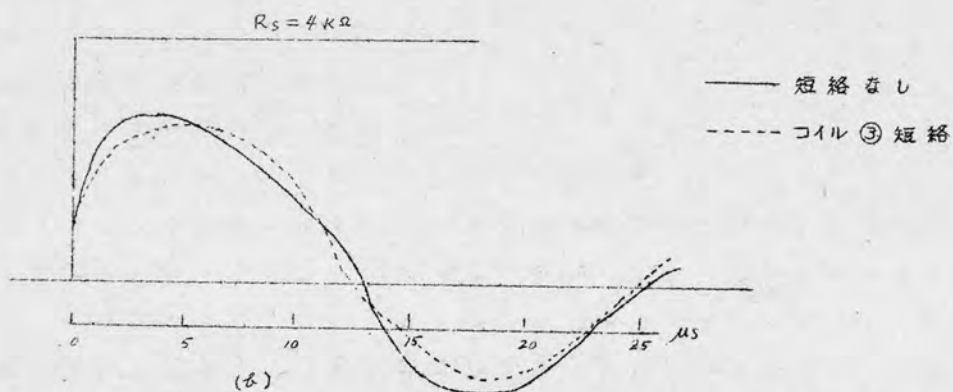
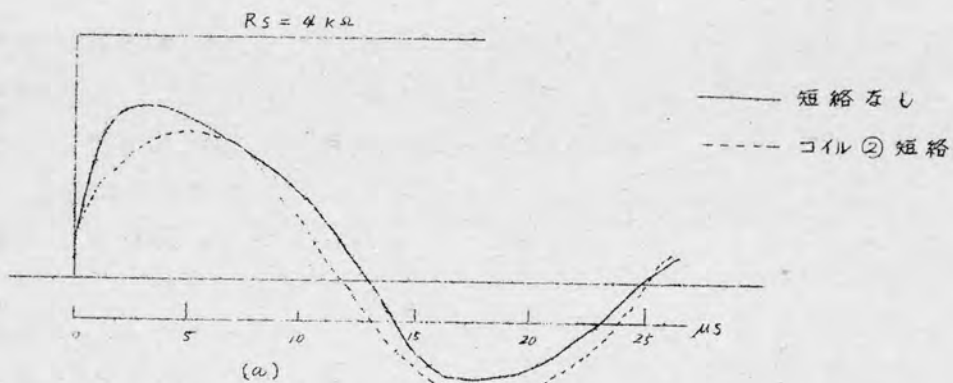
40 kVA 発電機の1相分の線輪数24本をその半分12本にした時は隔極接続法を採用しているので、残りの12本の巻線の両端子を開放した状態においては重層巻と類似して来る。供試相は前述の場合と同様にV相で短絡した線輪はV相の出力端子より2番目, 3番目, 5番目, 7番目, 10番目の線輪である。試験はPケースおよびQケースにおいて実施した、短絡した時のV相巻線の過渡波動インピーダンスを示したものが第6.10図である。さらに前述したと同様、短絡した時と短絡しない時の過渡波動インピーダンスを比較したのが第6.11図, 第6.12図で、第6.11図はPケース、第6.12図はQケースである。

第6.10図 40 kVA (1相分の線輪数12本) の線輪を短絡した時の
過渡変動インピーダンス波形





第 6.11 図 P ケース、線輪短絡した時の過渡変動インピータンス



第 6.12 図 Q ケース、線輪短絡した時の過渡変動インピータンス

ノ2本の線輪に対しても24本と同様、短絡による波動インピーダンスの減少と波頭の伝播速度が速くなっている。試験ケースPuにおける線輪短絡による

第6.7表

短絡線輪 番号	波動インピーダンス (Ω)
	3030
2	2550
3	2700
	2850
7	2900
10	2900

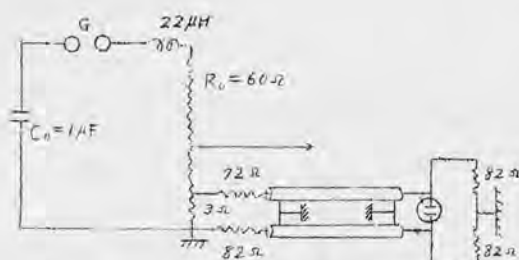
波動インピーダンスの減少を知るために、第6.7表を示した。さらに終端に500 Ω の抵抗を挿入した時の過渡波動インピーダンスを測定したが、挿入しない場合と比較して大した影響はない。

以上ノ相分の線輪数が24本、ノ2本の場合における線輪ノ本を短絡した結果、次の如く考えられる。

- (i) 線輪ノ本を短絡すると、当該線輪の鎖交磁束が減少するのは勿論、当該線輪からの磁束が減少するので、巻線のインダクタンスは減少する。
- (ii) しだがつて巻線の波動インピーダンスは短絡箇所において大きく減少すると共にその前後の波動インピーダンスも減少する。また巻線の伝播速度は速くなる。
- (iii) 巻線の波動インピーダンスの変化状態は巻線の短絡箇所で異なる。これは鎖交磁束の変化であるが巻線方式をも関係する。

6.3.2 巻線の対地電圧および接地電流に及ぼす影響について

40kVA発電機のU、V、およびW相巻線を三相一括して標準波形を印加し、巻線電圧の測定の際は終端を接地し、接地電流の測定は終端に500 Ω の抵抗を挿入して、抵抗の電圧降下に換算して測定した。使用した衝撃電圧発生器の定数は



第6.13図

第6.13図に示す通りである。

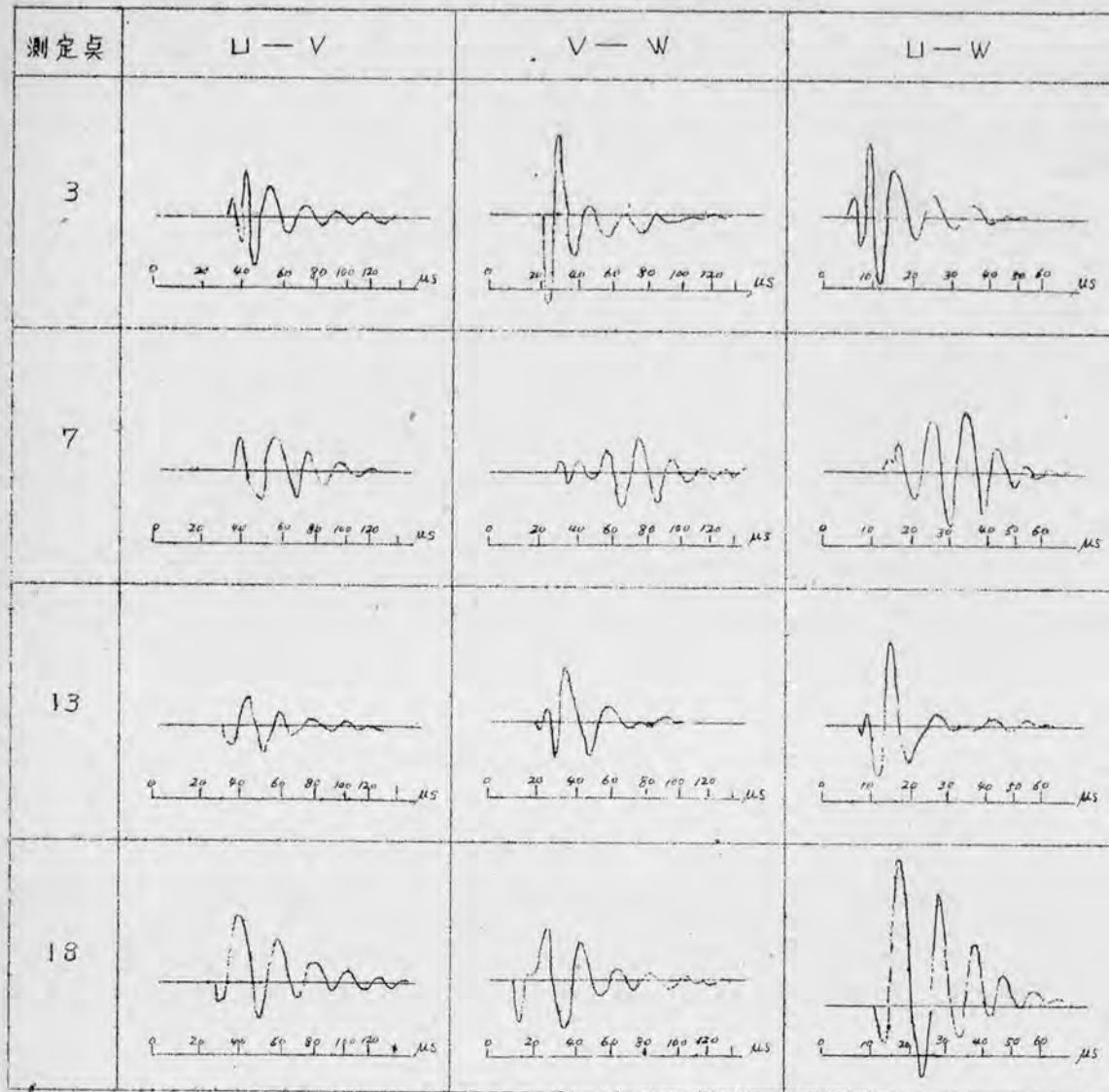
実測はノ相分の線輪が24本のとときノ2本の時、二回行った。

(1) ノ相分巻線が24本の場合

ノ相分巻線が24本の場合、主相一括して、各相巻線の線輪対地電圧は、第4章に述べた如く、同一の対地電圧波形でない。各相間の不平衡を測定した結果が第6.14図である。

このオシログラムから各相間には不平衡があることを知る。測定はブラウン管の偏向板に最初の線輪端子で約2.5kVの電圧が加わるようにして行った。次にU、V、およびW相巻線の始端（出力端子）よりノ2番目の線輪の対地電圧波形が夫々自相巻線の始端より3番目、7番目、ノ3番目およびノ8番目の線輪をそれぞれ短絡した時、どの程度変化するかを測定したのが第6.15図である。

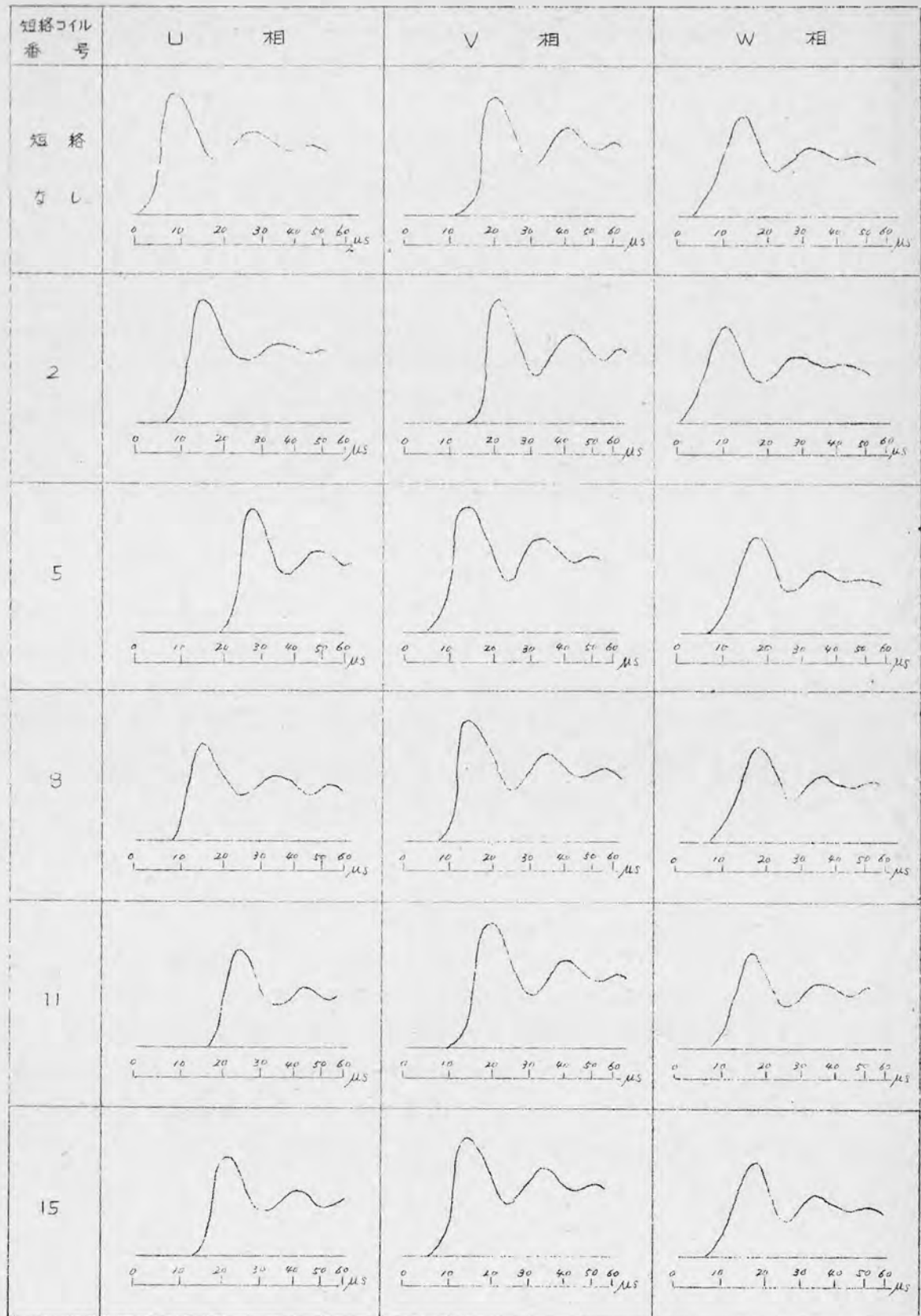
第6.14図 電圧平衡状況 (40 kVA)

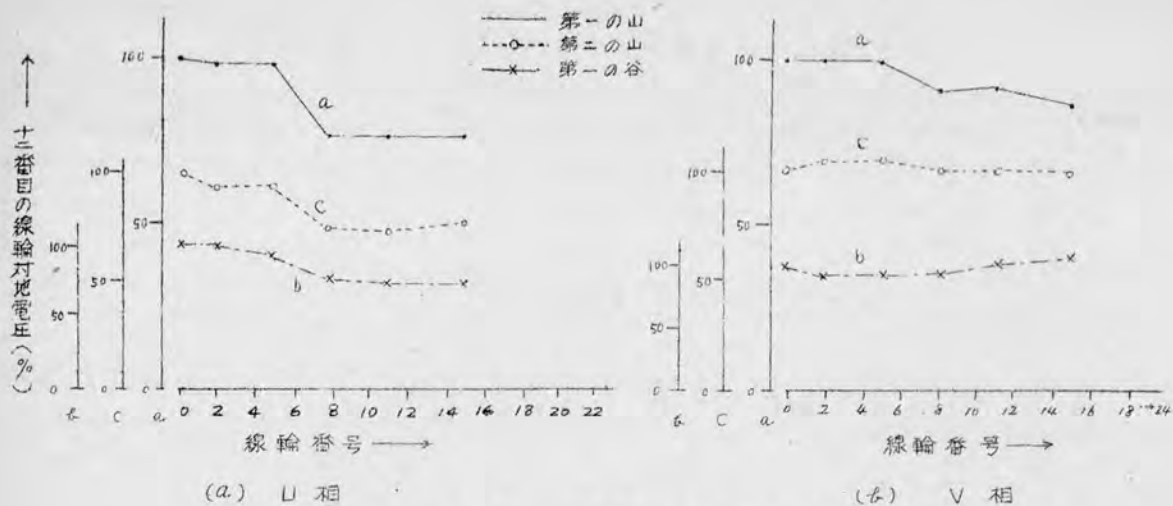


このオシログラムから、U相とV相の線輪の短絡がない時のそれぞれ巻線の12番目の線輪対地電圧を100%として、第1の山、第2の山、第1の谷の大きさの変化を短絡線輪に対して作図したのが、第6.16図である。

出力端子より12番目の線輪の対地電圧は、同相巻線中の線輪を短絡することにより、変化するが、その変化が短絡する線輪の位置により異なっている。またU相巻線とV相巻線とでは、線輪短絡による12番目の線輪端子電圧の変化の程度も異なってくる。

第 6.15 図 各相巻線の線輪をそれぞれ短絡した時の各相 12 番目線輪の
対地電圧



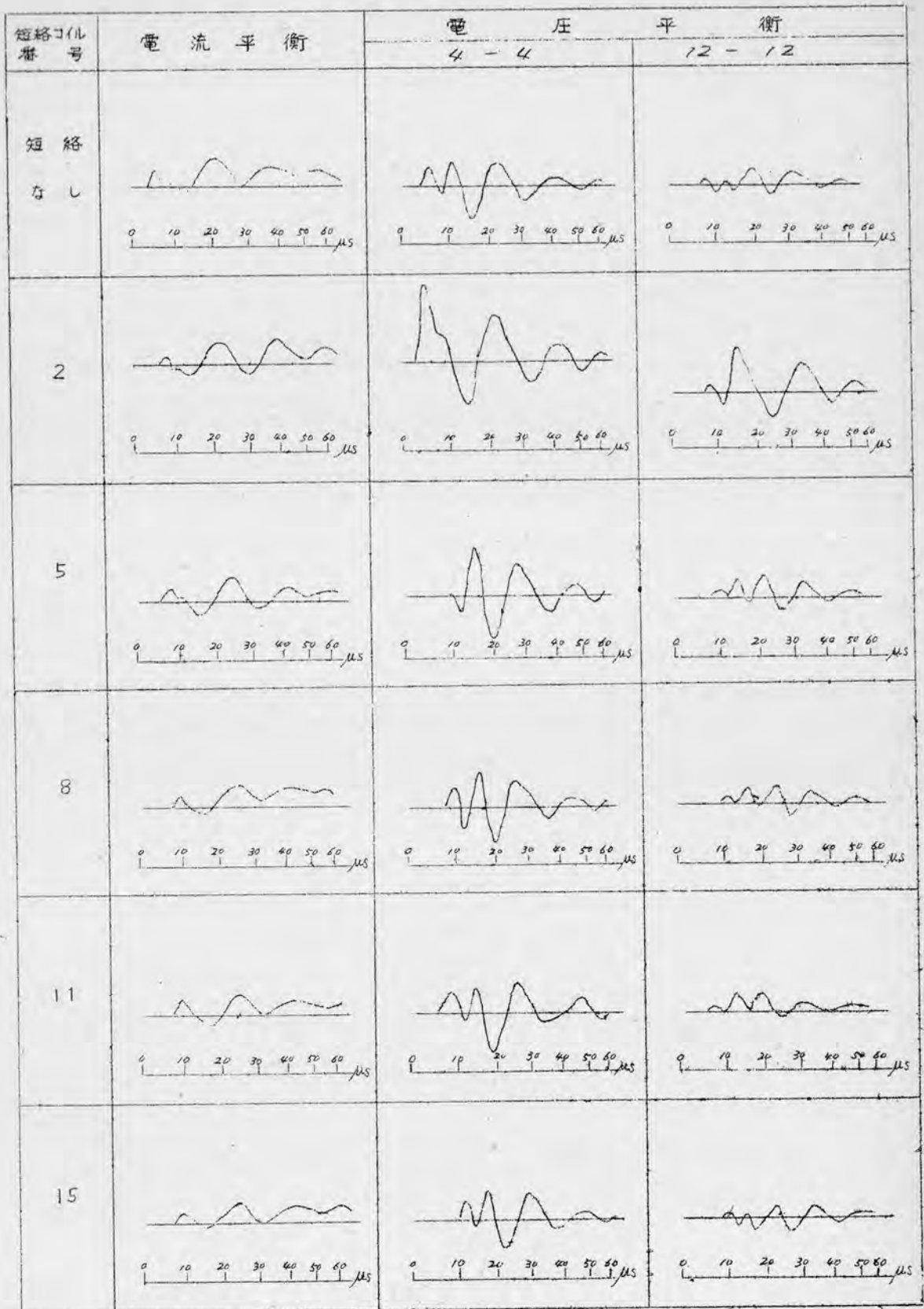


第 6.16 図 巻線の線輪を短絡した時のノ 2 番目の線輪対地電圧

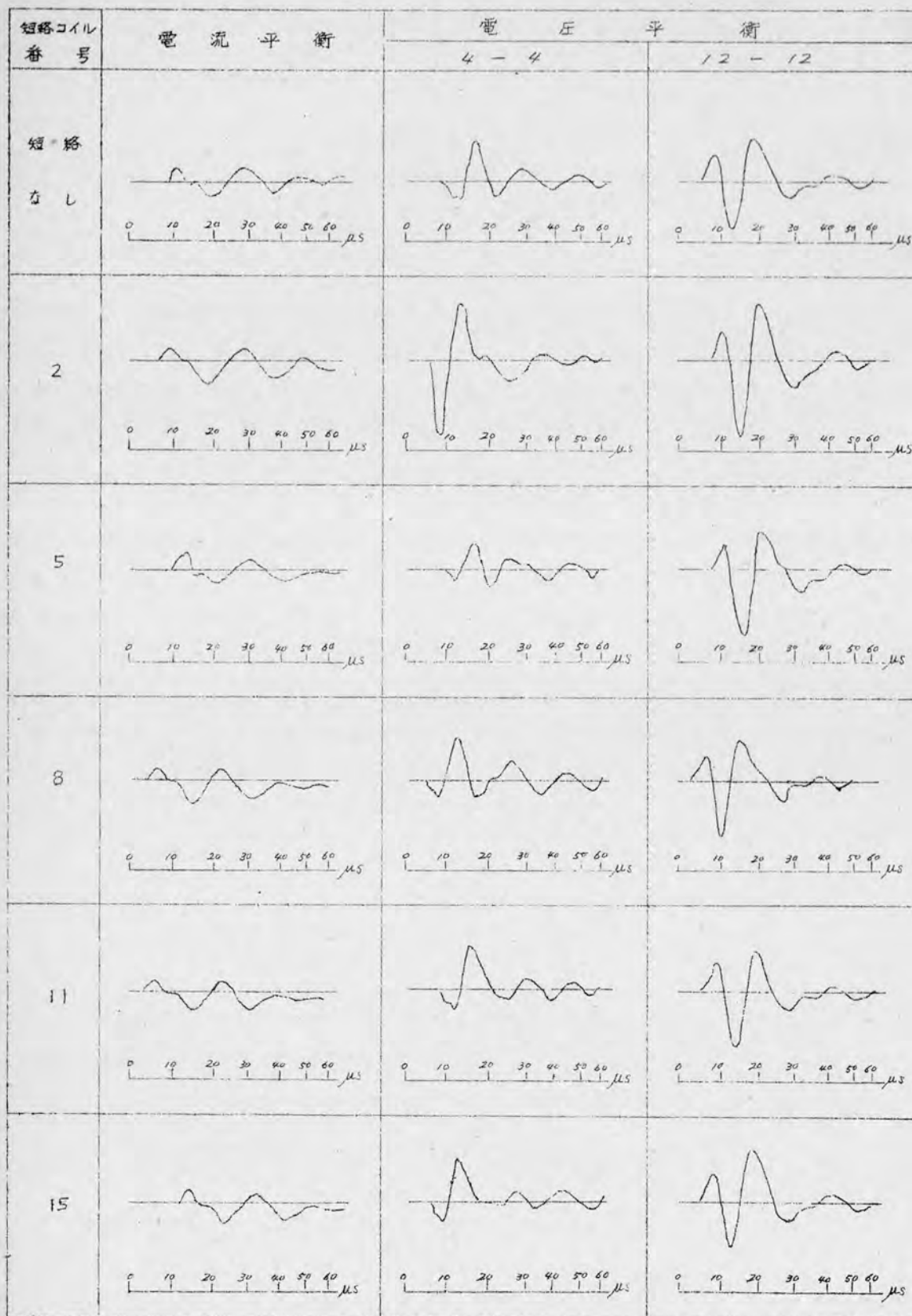
以上実測結果について述べたが、この定折的な解析は第 6.4 節において述べることにして、要約すると、短絡による対地電圧の変化と巻線内の磁束の変化であり、したがって線輪分担電圧と巻線内の伝播速度に関係して来る。

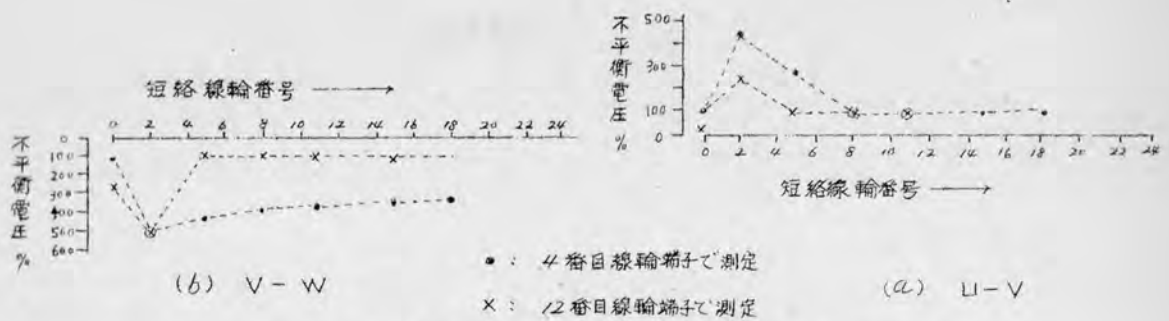
次に L、V、W 相を一括して標準波を印加し、L 相 V 相の出力端子より 4 番目の線輪端子対地電圧の差、またノ 2 番目の線輪対地電圧の差の変化を V 相巻線の線輪を短絡して実測したのが、第 6.17 図で、V 相と W 相巻線とにおいて同様実測したオッシログラムが第 6.18 図である。さらに各相の終端に抵抗 500 Ω を大地間に挿入し、接地電流を測定したオッシログラムを第 6.17 図および第 6.18 図に示してある。これらオッシログラムより、線輪端子対地電圧の差、すなわち電圧不平衡が短絡による変化するのが見られる。接地電流においても同様である。電圧、接地電流の不平衡の測定結果は第 6.4 節において述べる。

第 6.17 図 U-V 巻線に平衡法を適用した時の電圧電流波形



第 6.18 図 V-W 巻線に平衡法を適用した時の電圧電流波形





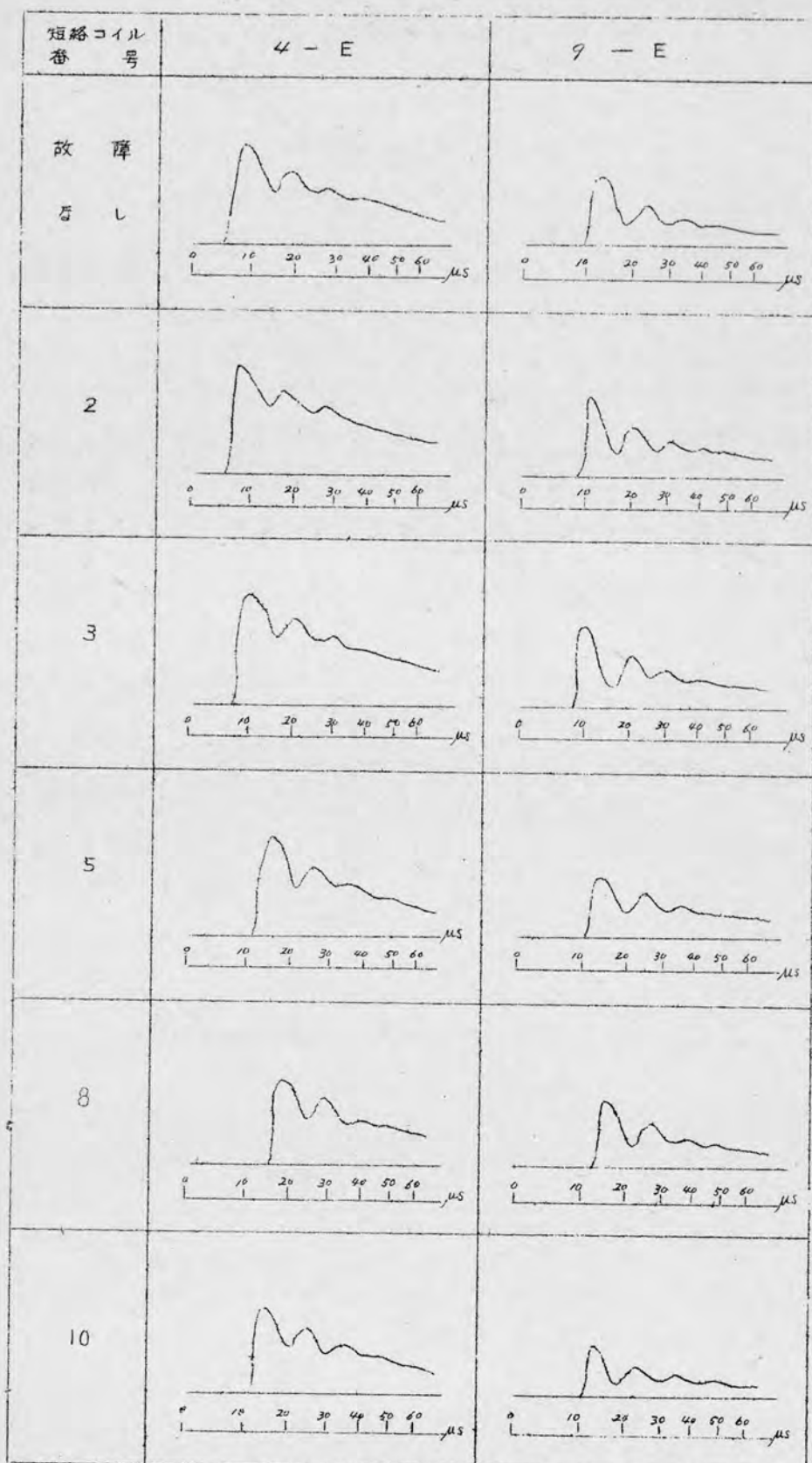
第 6.19 図 短絡による電圧の不平衡 (線輪 24 本の場合)

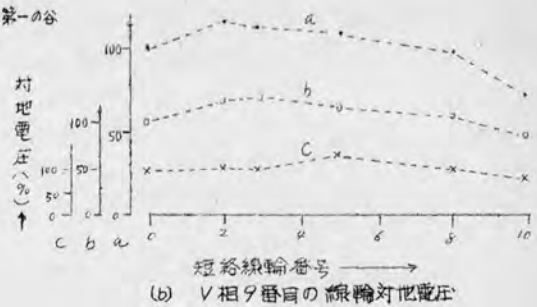
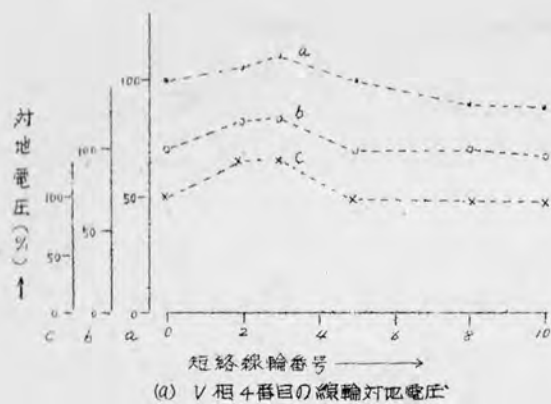
第 6.17 図、第 6.18 図における短絡した時の電圧不平衡を各線輪に対してそれぞれ求めたのが第 6.19 図である。(a) 図は L 相と V 相巻線間、(b) 図は V 相と W 相巻線で、短絡がない時の不平衡電圧を 100% とした。L-V 間では 4 番目の端子の方が 12 番目の端子より短絡による不平衡が大きく、V-W 間においても同様である。

(2) 1 相分の巻線が 12 本の場合

1 相分の巻線が 12 本の場合も前述した 24 本の場合と同様に測定した。三相一括して標準波を印加し、V 相巻線の出力端子より 2 番目、3 番目、5 番目、8 番目、および 10 番目の線輪を短絡した時の V 相巻線の 4 番目、9 番目の線輪対地電圧の変化を測定したオッシログラムが第 6.20 図である。このオッシログラムが、第 6.16 図と同様に V 相巻線の線輪短絡による V 相 4 番目、9 番目の線輪対地電圧の変化を、短絡がない時の対地電圧を 100% として求めたのが、第 6.21 図である。

第 6. 20 図 V 相 (線輪/2本) 線輪を短絡した時の対地電圧

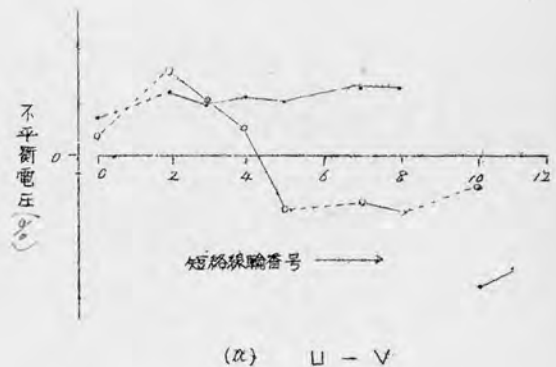
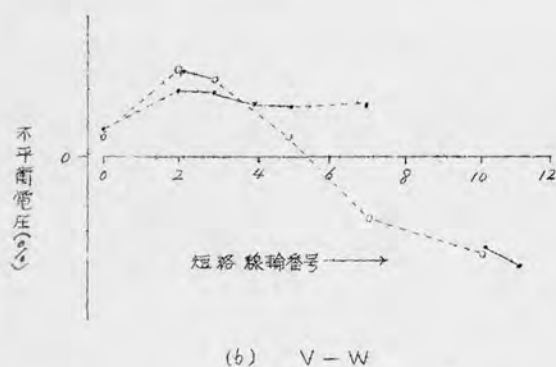




第6.21図 V相巻線の線輪を短絡した時の対地電圧の変化

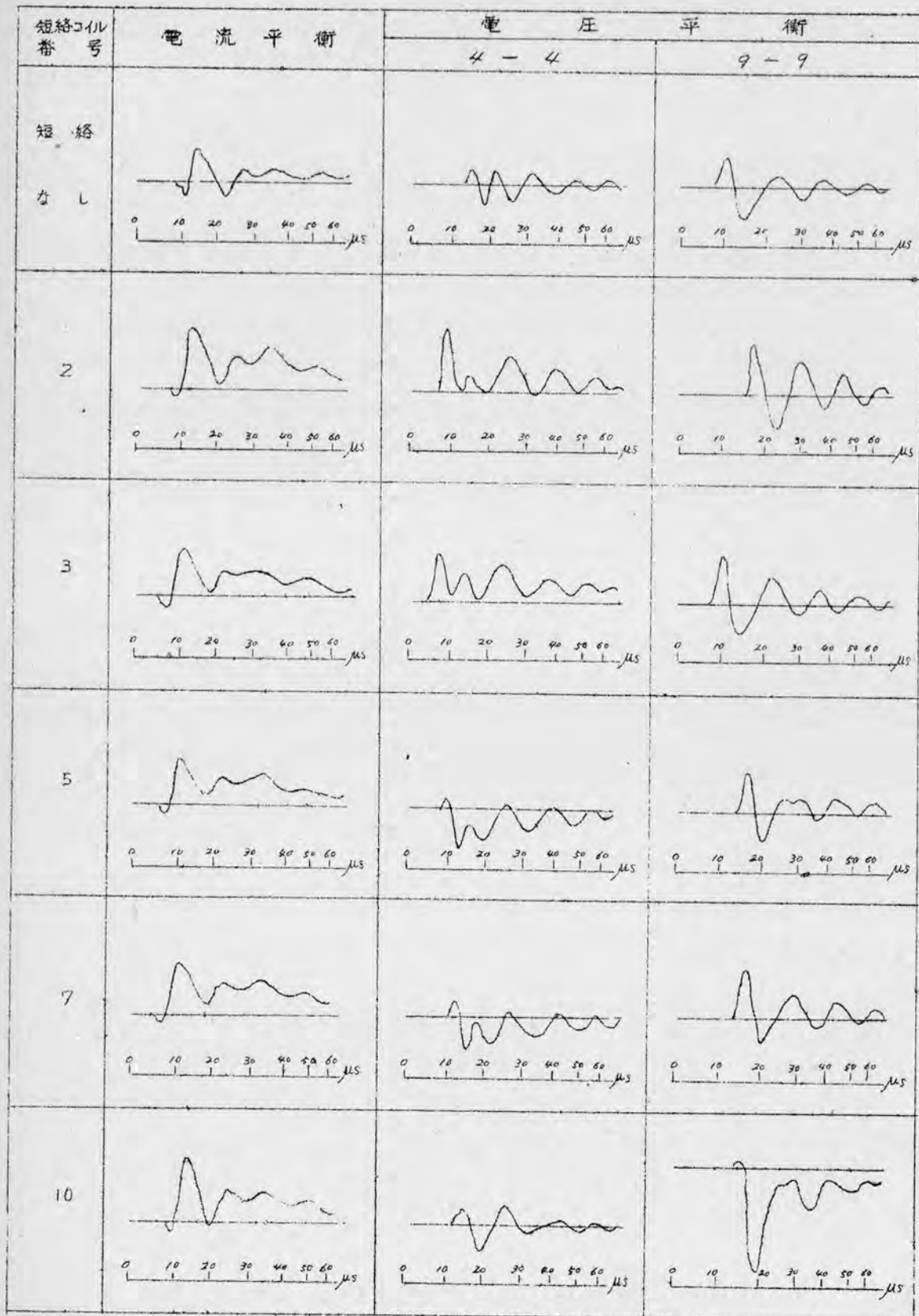
次に、U相とV相の出力端子より4番目および9番目の線輪対地電圧の短絡による不平衡を求めたのが第6.22図、さらにV相とW相巻線とについて同様に求めたのが第6.23図である。対地電流については挿入抵抗500Ωにて測定した。そのオッシログラムは第6.22図および第6.23図にそれぞれ示しておいた。

第6.22図および第6.23図より、第6.19図と同様に短絡による不平衡を短絡線輪の位置について求めたのが第6.24図である。短絡がない時の不平衡を100%とした。

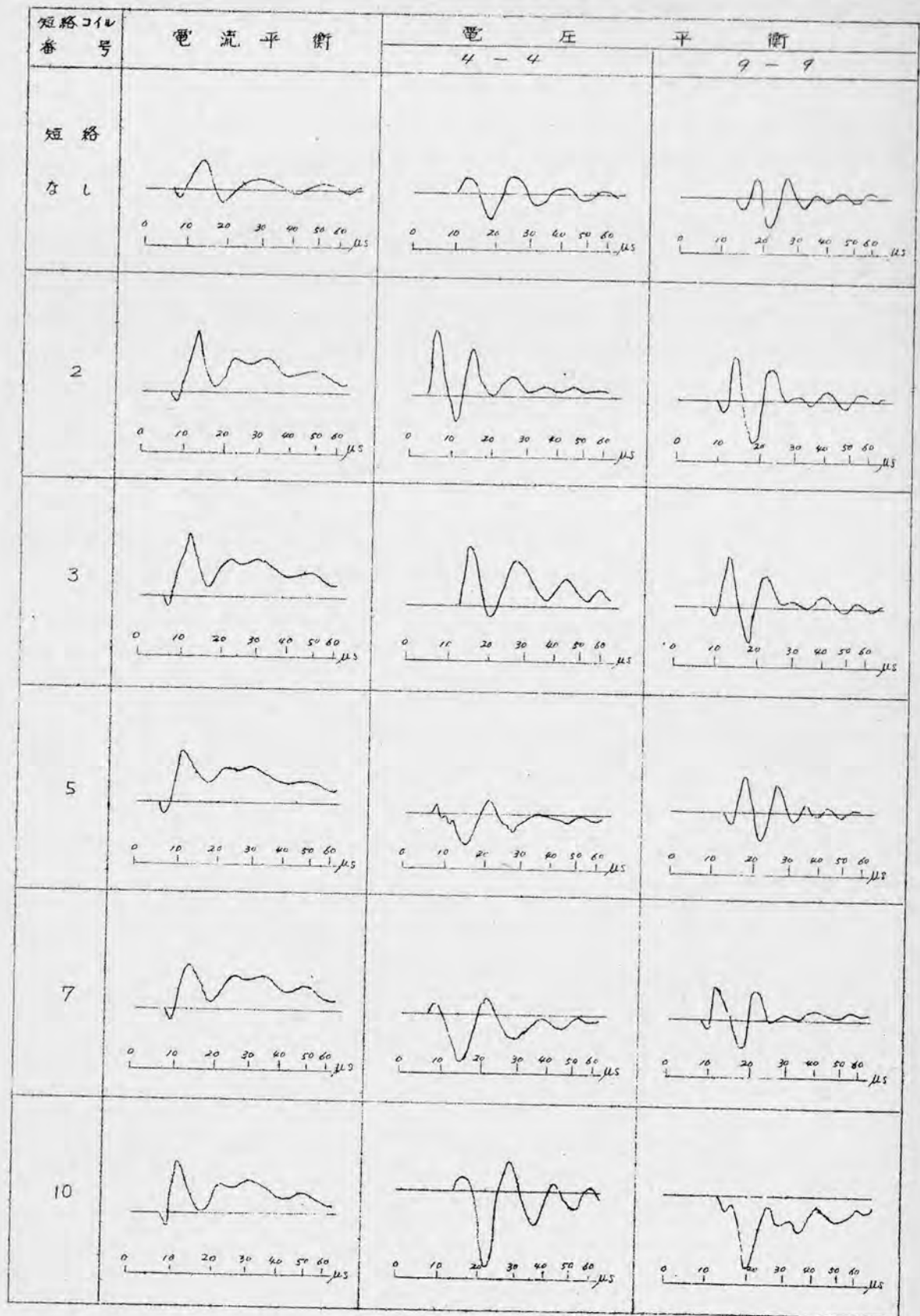


第6.24図 短絡による不平衡電圧（線輪12本の場合）

第 6.22 図 U-V 巻線に平衡法を適用した時の電圧・電流波形



第6.23図 V-W巻線に平衡法を適用した時の電圧電流波形

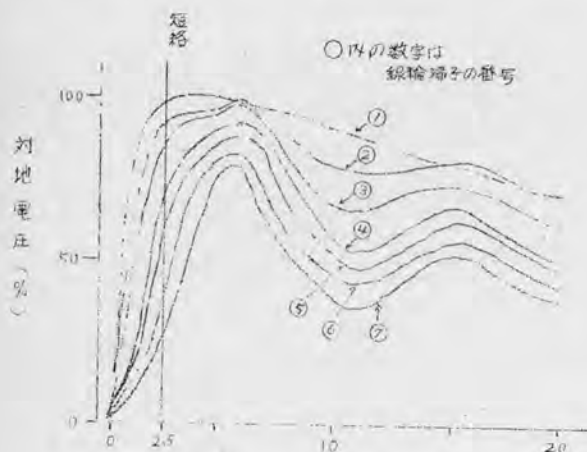


§ 6.4 巻回固短絡の検出の原理と方法

本節において巻回固の短絡を検出する原理とその方法について述べる。

6.4.1 対地電圧の変化による巻回固短絡の検出

40 kV A 発電機の巻線ノ相分の線輪数は24本であるがこれをノ2本にしてV相の始端より7番目の線輪の対地電圧を測定した。そのオッシログラムが、第6.25図である。今電圧印加後2.5 μ sで2番目の線輪が短絡したとする。また

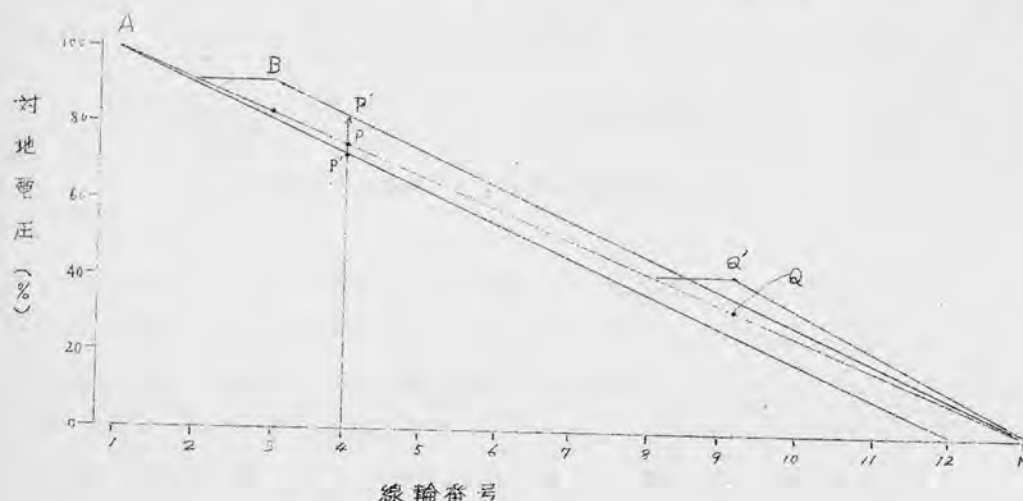


第6.25図 V相の対地電圧

その時の対地電圧の変化を4番目の線輪端子で測定しているとする。短絡が生ずると、それ以後においては、短絡により短絡した線輪以外の線輪の磁束は変化しないものとする。2番目の線輪対地電圧は3番目の線輪対地電圧となり、各線輪の対地電圧は順次一つ前の線輪の対地電圧となり、短絡を検出することになる。この場合4番目の線輪端子の変化を測定している

ので3番目と4番目の線輪端子対地電圧の差が大きい程検出感度は高いことになる。すなわち、3番目の線輪分相電圧が大きい程検出感度は高い。

巻線のある時固の電圧分布を第6.26図AN曲線であらわす。その時電圧測定は4番目の線輪の対地電圧はAN曲線上のP点とする。今2番目の線輪が短絡すると、その後の巻線の電圧分布はABNとなり、A、ノ2の曲線と変化する。したがってP点は2番目の線輪の短絡によりP'に移動し、PP'の電圧変化が生



第6.26図

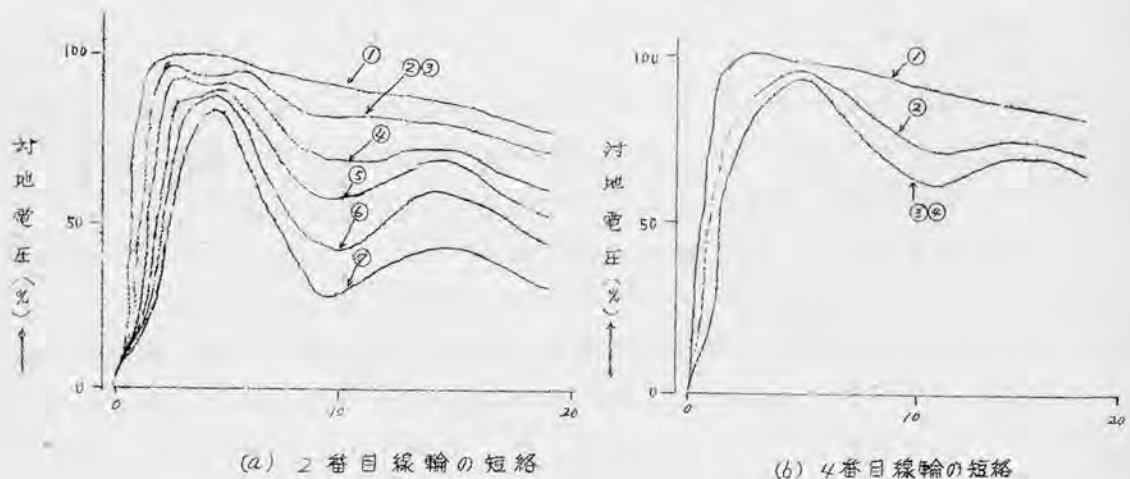
ずる。次に々番目の線輪より終端側の8番目において短絡が生じると、9番目の線輪より終端側の電圧分布はQ Nの曲線となる。線輪が1本短絡すると巻線の電圧分布はN 突か1/2の所に移動し、A/2 曲線となる。したがってP 突はP'に移動し、々番目の線輪の対地電圧はP P'の減少となる。P P', P P'の変化量は電圧分布曲線A Nの傾斜に關係する。したがって線輪分担電圧が大きい程変化量は大きくなる。

第6.26図による考察により、短絡が生じた時、短絡した線輪より終端側の線輪対地電圧は上昇し、始端側の線輪対地電圧は降下することが理解された。

考察の場合には

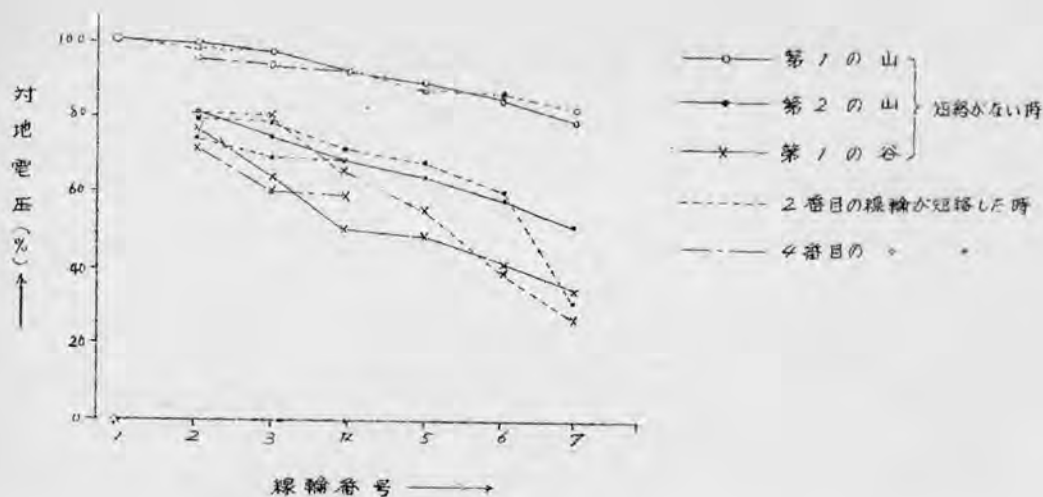
1. 巻線の電圧分布が第6.26図のように均等分布とはならないし、また電圧分布曲線は時間により変化する。
2. 線輪が短絡した時、短絡線輪以外の線輪には磁束の変化がないと仮定したが、第6.2節に述べた如く、磁束の分布は変化する。

したがって、線輪短絡によって巻線の対地電圧の波形かどのようになるか実測した。そのオッシログラムは第6.27図に示す。(a) 図は2番目の線輪を短絡した時、(b) 図は々番目の線輪を短絡した時、の対地電圧波形で、第6.25図の短絡していない時の対地電圧波形と比較すると対地電圧波形をも変化している。また(a) 図と(b) 図より短絡する線輪によっても異なっている。



第6.27図 線輪を短絡した時の巻線の対地電圧

第6.25図、第6.27図の対地電圧波形の第1の山、第2の山、および第1の谷の波高値と始端電圧100%として求めた曲線が第6.28図である。第6.26図は、第1の山について述べたもので、第6.28図と大体一致している。第2の山、第1の谷の短絡による電圧値の変化は第1の山より顕著である。それ故に電圧の短絡による変化量は電圧波形の第1の山より、第2の山、第1の谷の方が大きい。



第6.28図 対地電圧の変化状態

以上考察した結果、次の如く要約される。

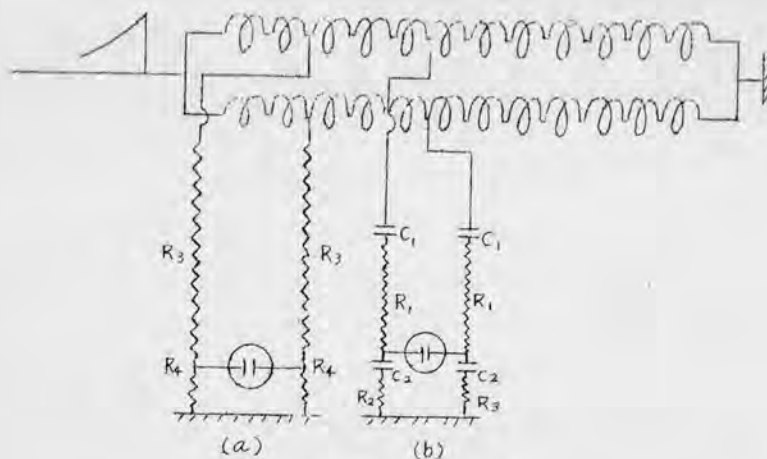
- (i) 線輪が短絡すると巻線の各線輪の対地電圧は変化する。短絡点より始端側の線輪対地電圧は短絡前より降下し、終端側の方は増加する。
- (ii) 変化量は線輪分担電圧の大きさ、(附録第⁶章第6.1図参照)巻線中の

各線輪の鎖交磁束の変化によつて定まる。したがつて第6.2節第6.3節の結果より漏洩インダクタンスの減少の割合に関係するので、線輪の配置によつて、また短絡線輪の位置によつて対地電圧の変化量は変動する。

次に巻線間の短絡に対する対地電圧の変化であるが、これは第6.2節において述べた如く、漏洩インダクタンスの変化は線輪ノ本の短絡の50～80%あるので、巻回間が短絡した時の分担電圧は線輪ノ本短絡した時の線輪分担電圧の50～80%の変化となる。したがつて巻回間短絡による対地電圧の変化は線輪ノ本の場合の50～80%となるので、線輪ノ本の短絡を検出し得る場合はノターン短絡の検出は可能である。

短絡による対地電圧の変化量を検出する方法としては線輪の対地電圧波形を測定すればよいが、第6.28図より知る如く、変化量は始端電圧の数%以下が多いので、直視により短絡を検出することは困難である。一度撮影したオシログラムを拡大し、波形の比較を行えばよいが、試験前の50～60%の試験電圧波形との比較は困難であるとともに、一般の人にわかつてもらうことはできない。

したがつて筆者は平衡法を適用した。その時の測定回路は2通り考えられる。第6.29図にそれを示す。



第 6.29 図 電圧平衡法

1. 抵抗分圧器を採用した電圧平衡法（電圧直接法）

第 6.29 図 (a) が抵抗分圧器を採用した方法で、この方法は日立製作所⁽²⁹⁾でよく適用している。この方法は線輪のつなぎ線または渡り線の絶縁を一部とりに除く必要があるが、発電機の固定子に線輪を納めた直後、つなぎ線、または渡り線に絶縁を施行しない前に試験を実施すればよい。

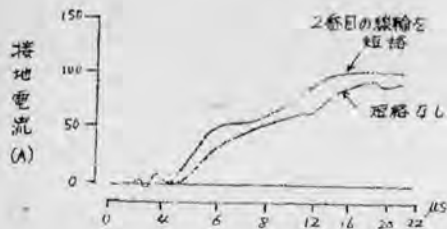
2. CR 分圧器を採用した電圧平衡法（電圧静電法）

この方法は第 6.29 図 (b) に示した通りで、 C_1 は巻線のつなぎ線または渡り線の絶縁補強し、その上にアルミ箔または錫箔を貼りつけて、大体 $5 \sim 10 \text{ pF}$ のものとする。または線輪の溝部の出口に同様に絶縁を補強して C_1 をつくる。この方法は発電機の絶縁を痛めることなく試験ができる。

電圧平衡法を採用する場合には次のことに留意する必要がある。

1. 検出感度を上げるためブラウン管の偏向板には $1500 \text{ V} \sim 2000 \text{ V}$ の電圧がかかるようにする。
2. 電圧の不平衡は分圧比を整調して極力小さくする。
3. 分圧器の取り付け位置はなるべく分担電圧の大きい線輪を選定する。したがって、始端より 3 番目または 4 番目の線輪端子に取り付けるのがよい。また 1000 kVA 発電機の如く巻線が折り返されている場合は 4 番目と 16 番目の線輪端子にとりつけるのがよい。(なるべく測定個所は多い方がよい)
4. 分圧器の抵抗は巻線の波動インピーダンスの数倍以上とする、すなわち取り付け位置が変位したにらぬようにする。

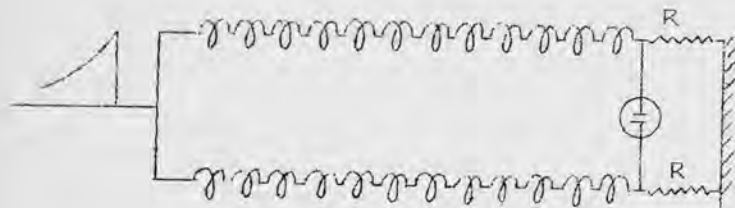
6.4.2 接地電流の変化による巻回間短絡の検出



第6.30図 接地電流

短絡が生じると、巻線の波動インピーダンスが減少することは第6.3.1項において述べた、今波動インピーダンスが、 280Ω の巻線の始端よりの2番目の線輪を短絡した時の接地電流を終端に 60Ω の抵抗を挿入し、測定したのが第6.30図である。印加波は $25kV(1 \times 40)\mu s$ である。このように1相の巻線のみにも短絡の有無を検出することはできる。第6.30図は線輪1本の場合であるが第6.2節において述べた如く巻回間の短絡による漏洩インダクタンスの減少は、線輪1本の場合の50～80%であるので、接地電流においても大体同様に考えられる。

接地電流の短絡による変化を確実に検出するために平衡法を採用する。この場合においても偏向板にかゝる接地電流の電圧降下を $1500V \sim 2000V$ 程度にとり、短絡による変化量を拡大することが必要である。

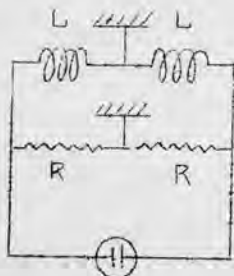


第6.31図 電流平衡法

第6.31図は電流平衡法の検出回路である。検出感度は第6.3.1項に述べた如く短絡する線輪の位置によつて変化する、波動インピーダンスの変化の大きい程検出感度は高いことは当然である。

6.4.3 漏洩磁束の変化による巻回間の短絡の検出


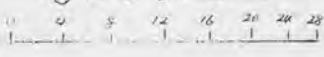
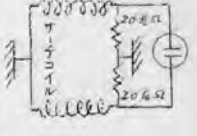


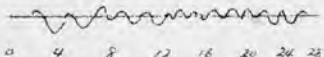
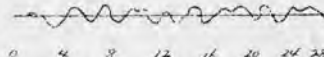
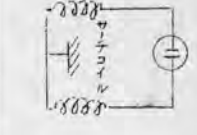


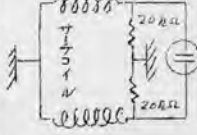
短絡による漏洩磁束の変化は第6.2節において述べた通りである。筆者は短絡による漏洩磁束の変化を検出するためサーチコイルを使用した。検出回路は第6.32図に示す。L、Rの数値はまだ定説がない。筆者は実験的にL、Rを定めている。



第6.32図 サーチコイル法
諸尊直彦

$4800kVA$ W相巻線において、始端より2番目の線輪を短絡した時、サーチコイルを各極の最初の線輪の溝部の出口にとりつけ、短絡の検出を行った。その時の検出回路と検出波形を示したのが、第6.32図である。

第 6.33 図 4800 kVA 二重星形 W 相

サ-チコイル の位置	短 絡 無	短 絡 有	測定回路
黒 相 第 1 極			
黒 相 第 2 極			全 上
全 上			
黒 相 第 4 極			

(註) 短絡せる線輪は 2 番目、短絡は球間隙を使用した。

サ-チコイル法を使用する場合は、その固有振動を利用するのであるから、最初の調整を十分行うことが大切である。(電磁誘導法)

§ 6.5 実 測 例

第 6.4 節で述べた検出法を実際に適用した例について述べる。

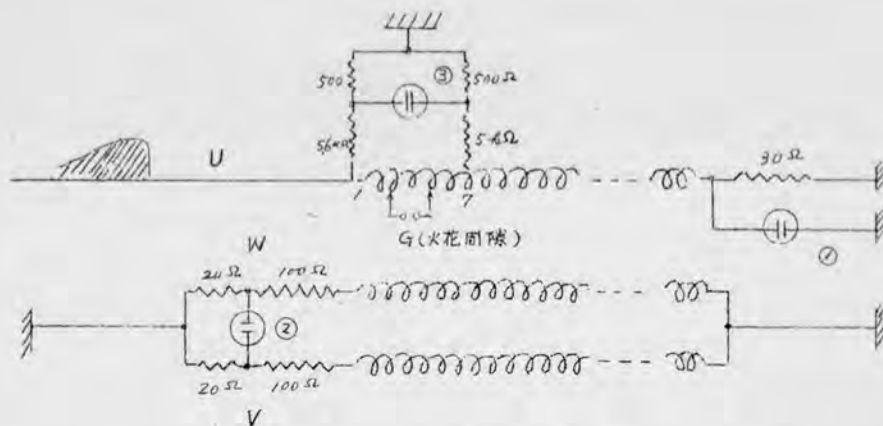
6.5.1 11 kV, 1,000 kVA 発電機

U 相に $(1 \times 40) \mu s$ を印加し、直径 5 mm の球間隙を火花発電して線輪短絡を行った時の各検出法の比較を、U 相と V 相とに $(1 \times 40) \mu s$ に印加し 平衡法を採用した時の各検出法の比較を行った。

(1) 1 相印加による^{巻回同}層短絡の検出

U 相に衝撃波を印加して短絡を検出する方法として用いたのは下記の通りであり、それらの適用は第 6.34 図の試験回路に図示した通りである。

1. 電流法。
2. 他相誘導法(短絡時の他相巻線の誘起電圧を測定)。
3. 分担電圧法。
4. 電磁誘導法。
5. 電圧静電法。

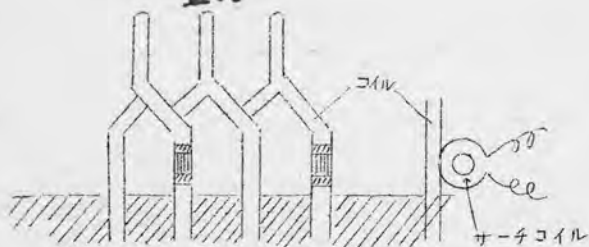


第 6.34 図 試験回路

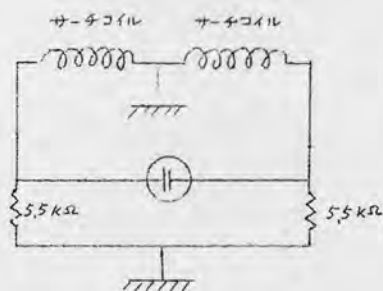
なおこれら検出法の名稱は便利上一つつけた名前であつて、一般的でないことを承知して頂きたい。

上記の検出法のうち、第 6.34 図に記入していない電磁誘導法、電圧静電法とは次の如きものである。

(a) ~~電磁誘導法~~
直接



第 6.35 図

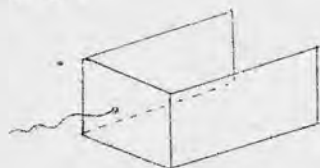


第 6.36 図

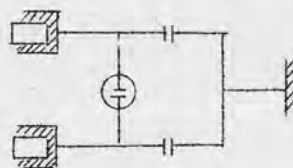
サーチコイルは 0.8mm のビニール線を外径 100mm に 80 回巻いたもので、これを第 6.35 図の如く、赤箱の 1 番目の溝部の出口と 3 番目に同様にとりつけ第 6.36 図の如き結線で試験を行った。

(b) 電圧静電法

溝部の出口の線輪直線部に第 6.37 図 (a) の如きブリキ板を絶縁物をはさんでさしこみ、(b) 図の如き回路で、電圧の変化を静電的にブラウン管で捕らえるようにした。取り付け位置はサーチコイルと同様 1 番目、3 番目の線輪の溝部の出口である。



(a)



(b)

第 6.37 図

短絡時の各検出波形は第 6.38 図に示す。

第6.38図 検出波形



〔註〕 1. 左側の欄に 2-7, 2-6 …… とあるは

印加端子より 2 番目のコイルの入口と、7 番目の入口の間を放電間隙を以て短絡したことを意味する。

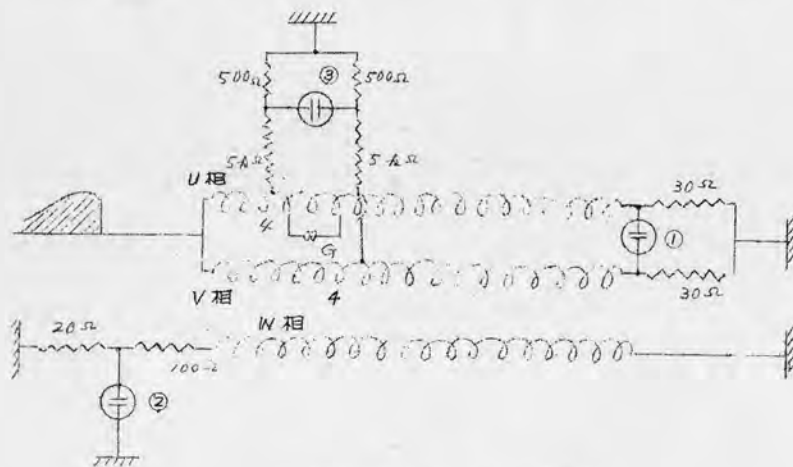
2. ※は 対地放電した場合の検出波形。

(2) 2相印加による^{巻回}層間短絡の検出法

U、V相に印加し、検出法としては平衡法を適用した。使用した検出法は、次の通りである。

1. 電流平衡法、
2. 黒相誘導法、
3. 電圧平衡法、
4. ~~電磁誘導法~~^{点接}、
5. 電圧静電法。

試験回路ならびに1、2、3の検出法の適用は第6.39図に示した通りであつて、~~電磁誘導法~~^{点接}、電圧静電法に(1)と同様な方法である。ただ取り付け位置は



第6.39図 試験回路

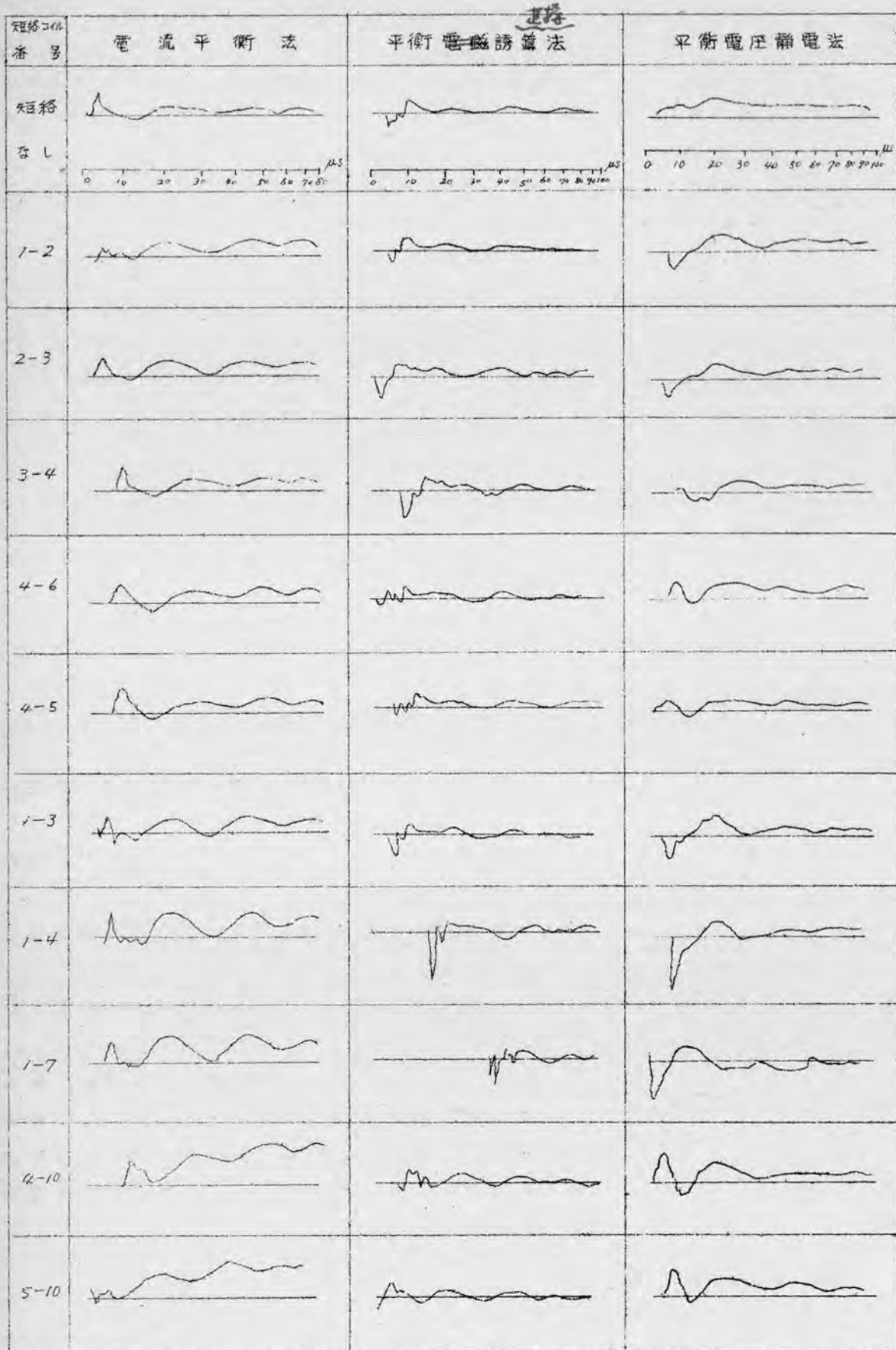
U相、V相ノ番目の線輪、3番目の線輪で、端子から同一距離の位置になる線輪を選定した。

本巻線は30本の線輪からなり、線輪のターン数は12ターンである。したがってノ相分のターン数は、 $12 \times 30 = 360$ ターンである。

U、V相に衝撃波を印加し、各検出法についてそれぞれの検出能力を調べた。その測定結果は第6.40図に示す通りである。

第6.41図において本試験に検出して列挙した電圧平衡法および黒相誘導法の測定したオッシロの現像波形がうすく、現像を識別することが不可能であるので、本報告に記載できなかったことは残念である。

第 6.40 図



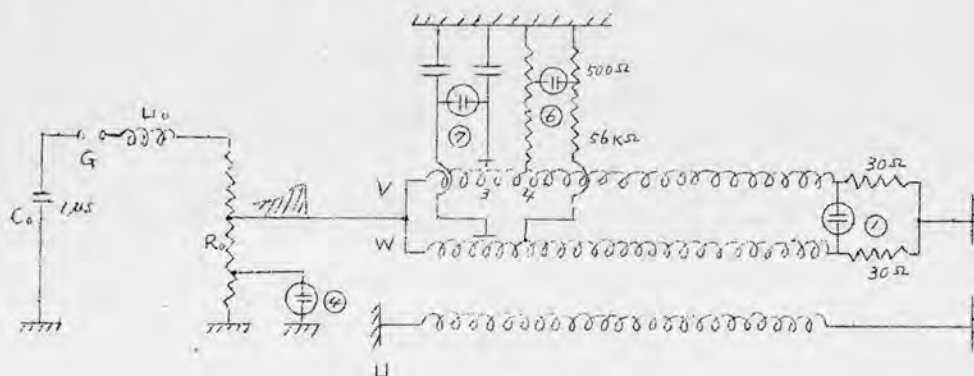
註： 左の欄の数字例えば 1-2 は 1 番目の coil, 2-3 は 2 番目の coil, 1-7 は 1 番目から 6 番目の coil の短絡を表す。
(212)

(3) 実験結果の概要

- (i) L相のみを印加し各検出法を適用した結果は、短絡による変化はあるが一見に見分けがつけにくい。
- (ii) 各検出法に平衡法(電流平衡法、平衡電磁誘導法^{直接}、平衡電圧静電法)を適用した方が検出感度は高い、したがって一重Y結線においても平衡法を適用することができる。
- (iii) 電磁誘導法^{直接}はその適用方法を検討する必要があることを認めた。

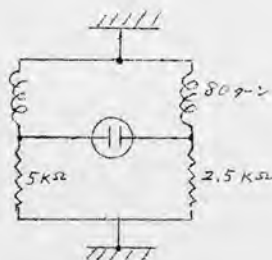
(4) V、W相巻線の絶縁破壊試験

V、W相に同時に衝撃波(1.0×40) μ sを印加し巻回周絶縁、対地絶縁の絶縁破壊を第6.41図回路により検出しながら実施した。



第 6.41 図

サーチコイルには80ターンで出力端子より3番目のコイルの上にV相、W相それぞれとりつけ、第6.42図結線により使用した。



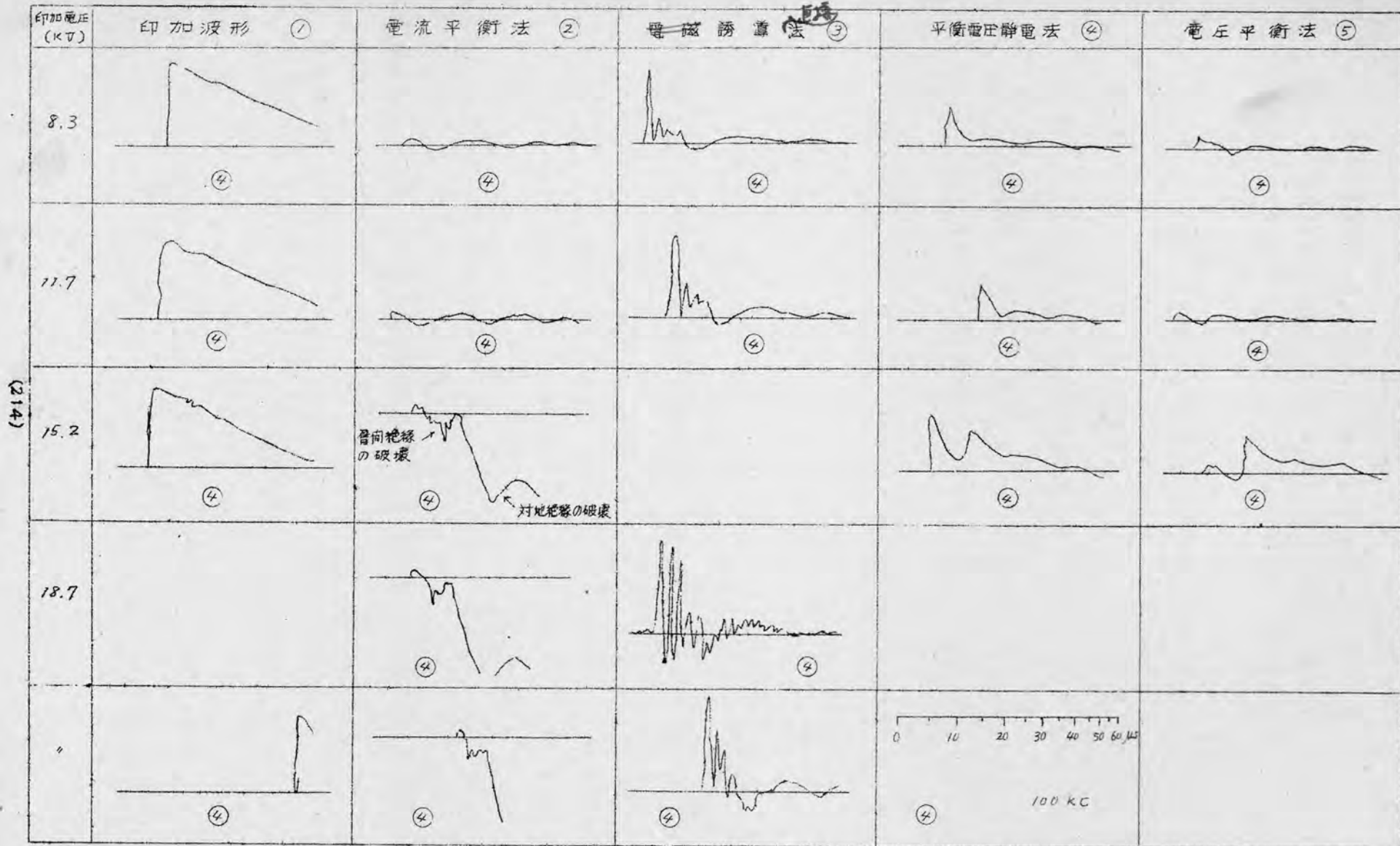
第 6.42 図

第6.42図の如く抵抗を遠えたのはV相、W相のサーチコイルへの誘導が異なるので、なるべく平衡がとれるために実施したが、余りその効果がなかった。

試験結果は第6.43図に各検出波形を印加電圧別に分類して示してある。

印加電圧15, 2 kVにおいて大地へ放電したのか、印加波形に局部振動性のものが入っているのでわかる。一方平衡電流法、静電法、電圧法、共に検出波形が大きく変化している。巻回周絶縁の破壊については、電流法の波形が最初の方の方向への突起部が生じているので巻回周絶縁が破壊された。

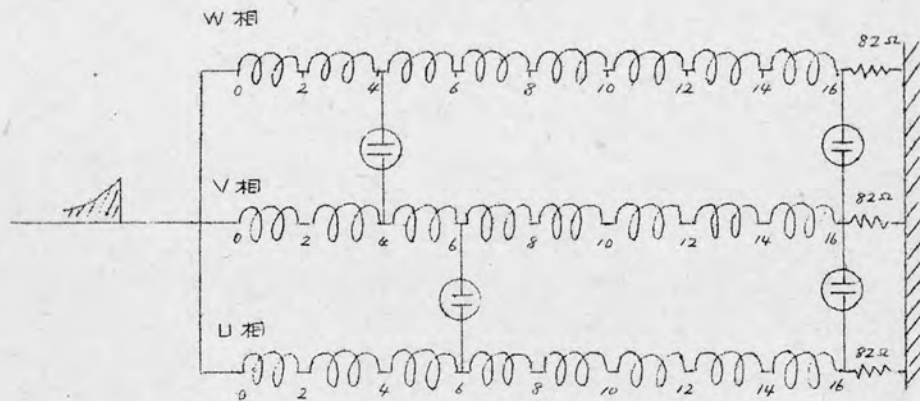
第6.43図 V、W相絶縁破壊時の検出波形



6. 5. 2 3.45kV・400kVA 発電機

(1) 検出法の感度試験

三相巻線を一括して $(1.2 \times 40) \mu s$ を印加し、電流平衡法、電圧平衡法の検出感度を調べた、短絡にはネオン管を用いた。



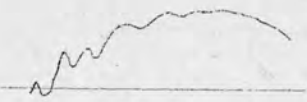
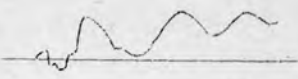



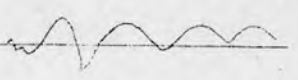
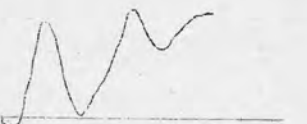


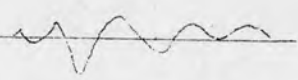
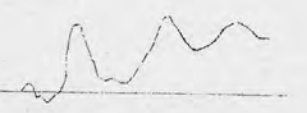

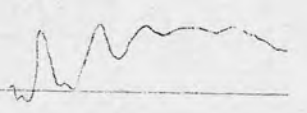
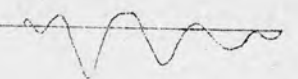
第 6.44 図

電流平衡法は、第 6.45 図 } に示す
電圧平衡法は、第 6.46 図 }

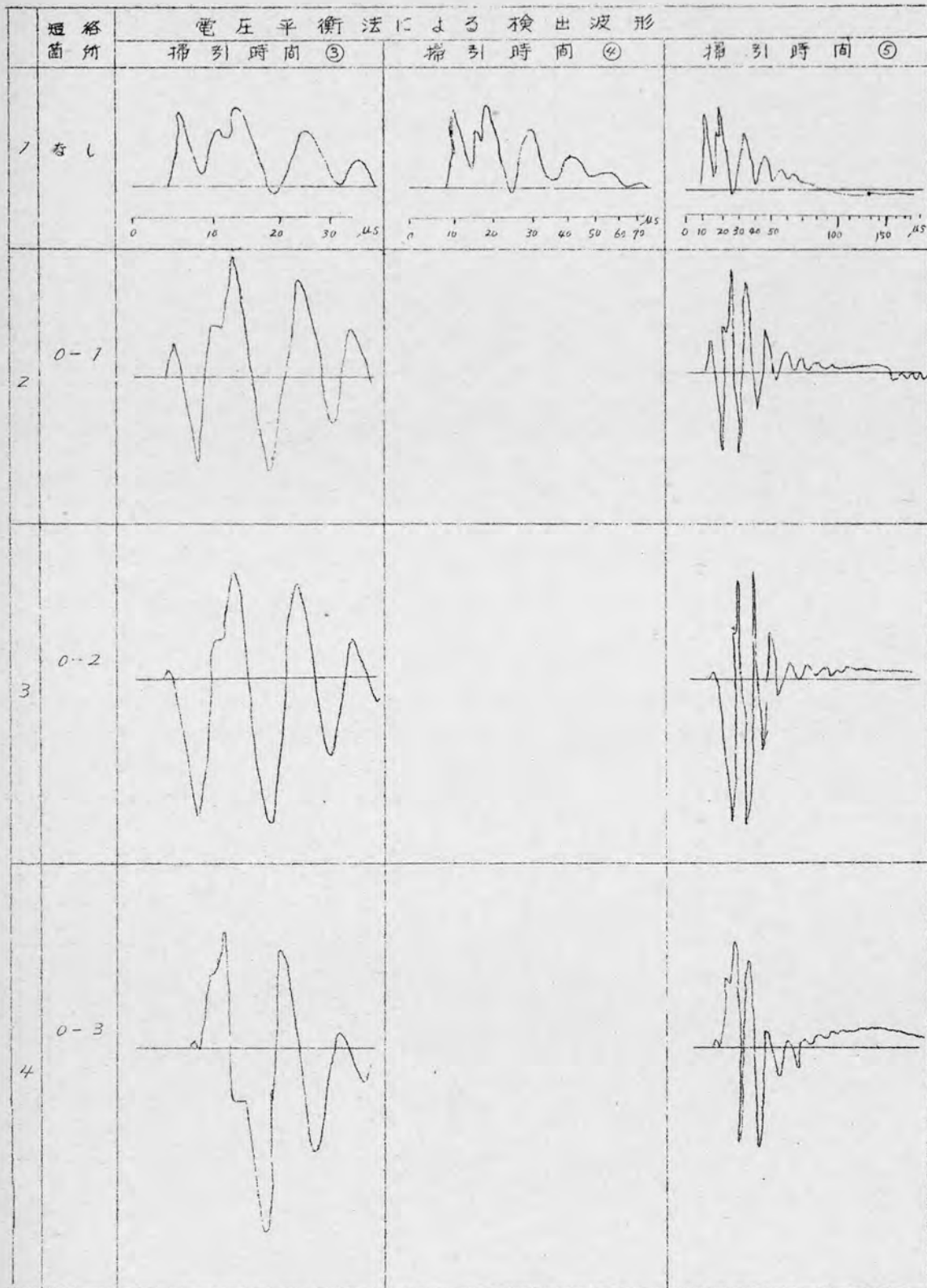
第6.45図 電流平衡法による短絡の検出
(V-U相)

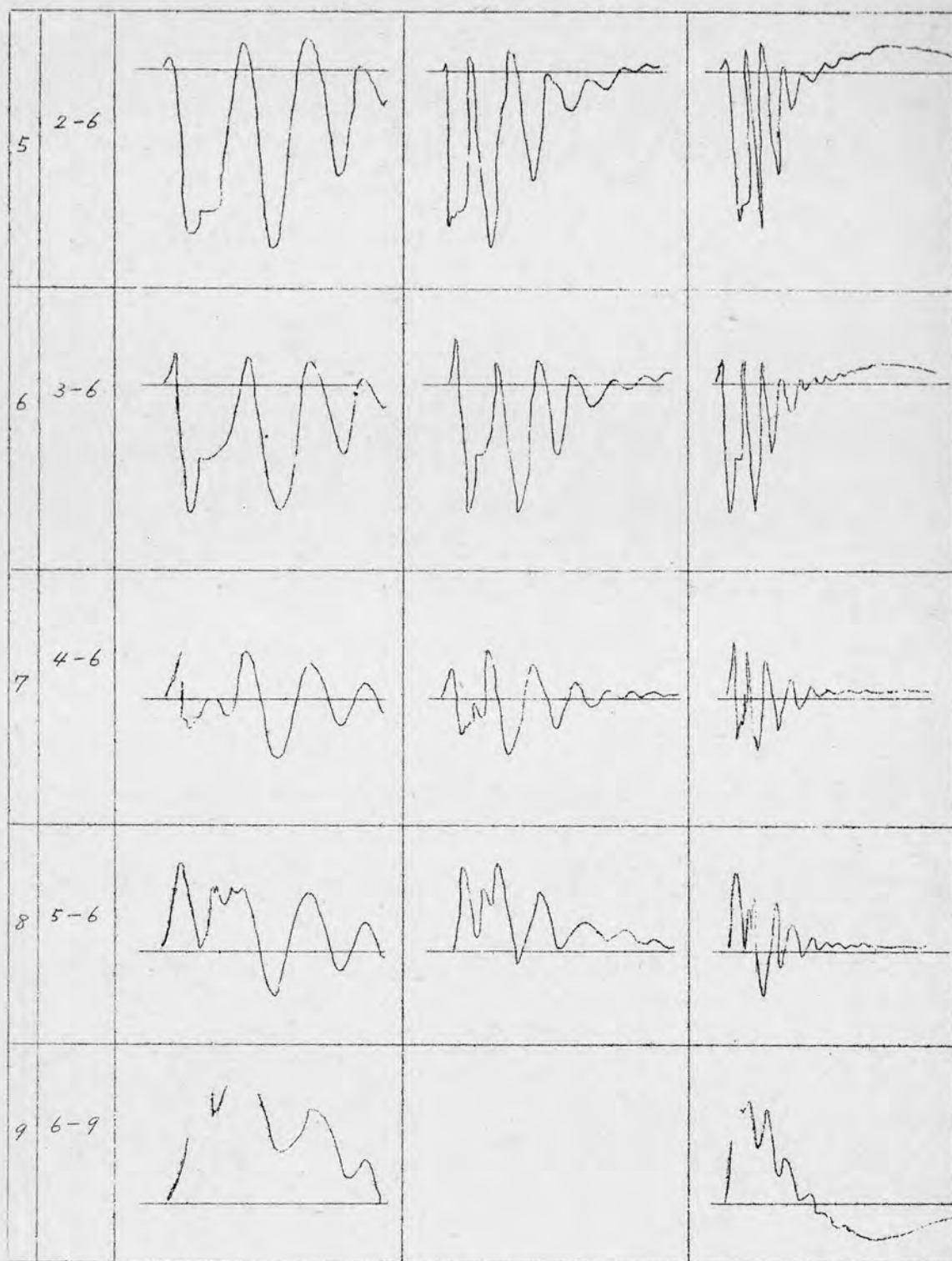
試験 番号	短絡 箇所	電流平衡法による検出波形	試験 番号	短絡 箇所	電流平衡法による検出波形
1	なし ③		5	3-6 V ③	
2	0-1 V ③		6	4-6 V ③	
3	0-2 V ③		7	5-6 V ③	
4	0-4 V ③		8	6-9 V ③	
	0-4 V ④				

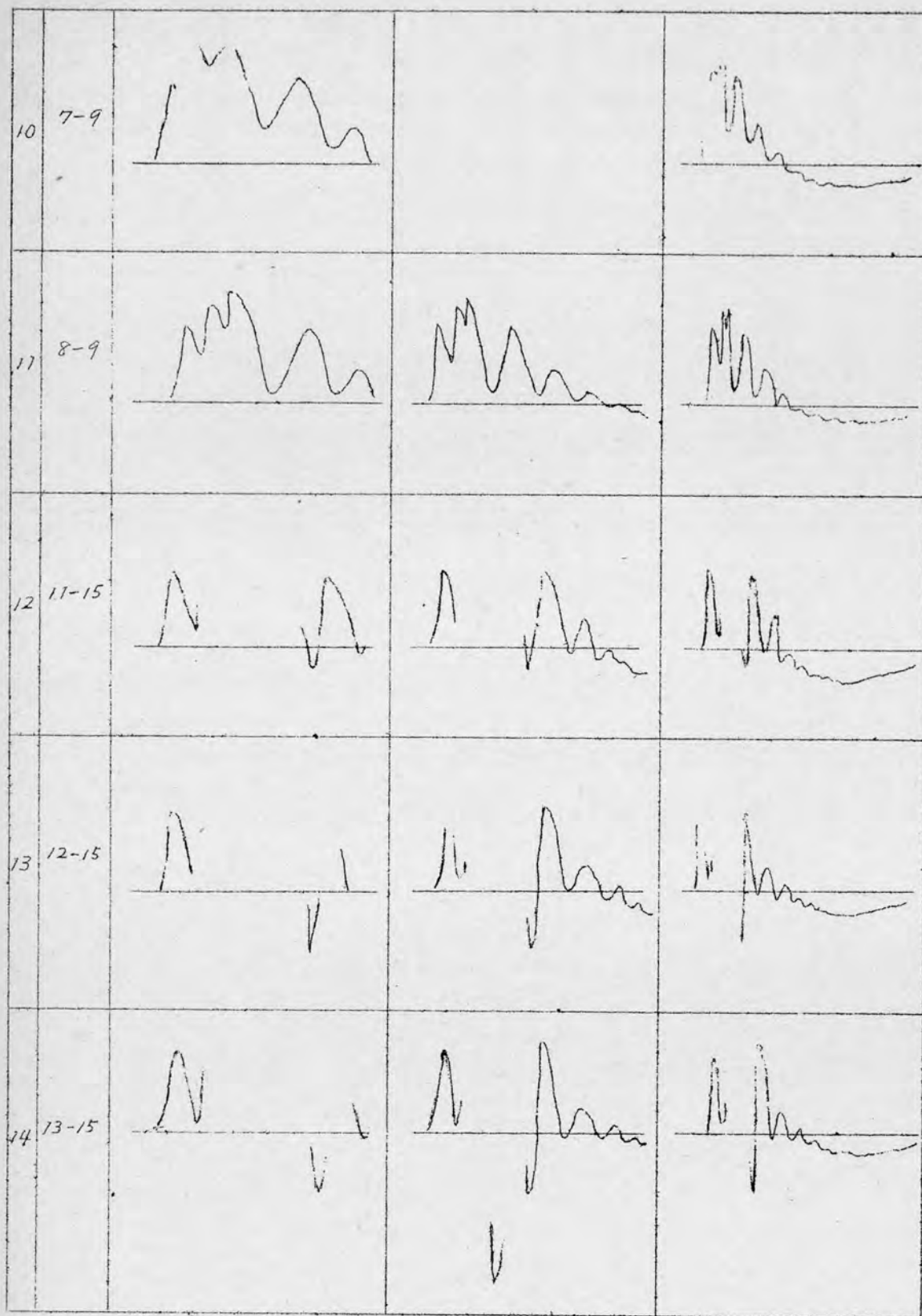
〔註〕 ○内の数字は掃引時間の記号
0-1, 3-6, 等は短絡箇所を示す。第6.44図の巻線の番号を参照

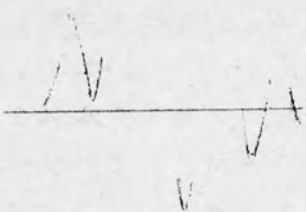
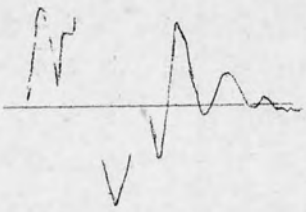


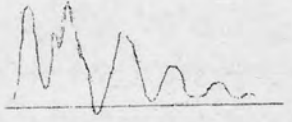
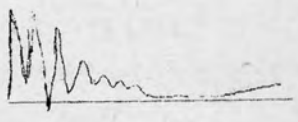
8	6-9 V (4)		14-15 V (3)	
9	7-9 V (4)		14 14-15 V (4)	
10	8-9 V (4)		15 1-2 L (3)	
11	11-15 V (3)		16 0-1 L (3)	
12	12-15 V (4)		17 0-2 L (3)	
13	13-15 V (3)		18 0-3 L (3)	
	13-15 V (4)		19 0-4 L (3)	

第 6.46 図 電圧平衡法による短絡の検出








15	14-15			
16	なし			

(i) 電流平衡法による短絡の検出

電流平衡法による短絡の検出は第6.44図の回路で、U相とV相との間において実施した。この場合の測定は印加電圧2000V位で実施した。測定結果を示したのが第6.45図の通りである。

第6.45図中の短絡箇所  とあるは、V相のノ番目の線輪を短絡(0-Vは第6.44図参照し、0とノとの間を短絡)、掃引速度は③(約40μs)で測定したことを表わしている。第6.45図は掃引速度を変えて、なるべく遅い時の現象をも測定した。第6.45図よりV相を短絡した線と、U相を短絡した結果とを比較すると波形の変歪が少ないので、検出はU相を短絡した時の検出が容易である。この理由は不平衡電流波形はV相の接地電流がU相よりも大きいため生じているので、短絡がV相に生じると、不平衡電流が拡大するだけで波形の変歪が著しくないことによる。この測定結果により

1. ノ個の線輪の短絡は電流平衡法で十分検出が可能である。

2. したがってノターン短絡をも検出することができる。

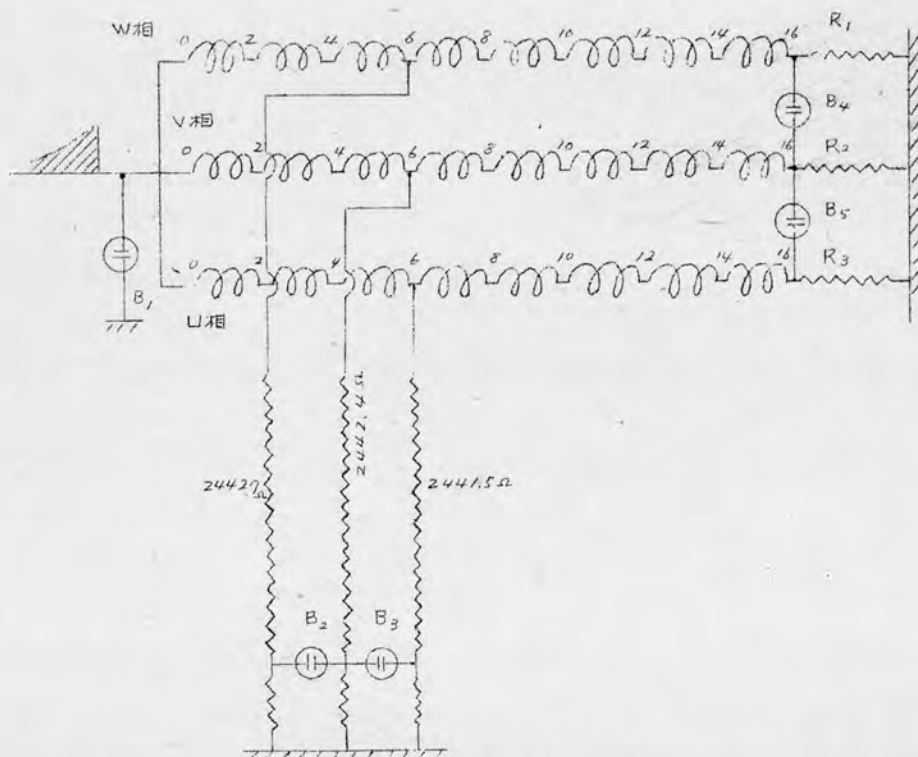
(ii) 電圧平衡法による短絡の検出

電圧平衡法はV相とW相の出力端子より6番目の線輪の入口にとりつけ、第6.44図の回路で試験を行った。短絡はV相の線輪をネオン管を使用して短絡した。その結果は第6.46図に示す通りである。図中には掃引時間を三通り変えて記しておいた。図中の検出波の波頭の振動は印加波形が波頭において振動しているために特に振動しているものと考えられる。

電圧平衡法において、線輪ノ個の短絡を充分検出しているので、供試発電機の線輪はノターンであるが、その中のノターン短絡の検出は可能と考えられる。

(2) 発電機の絶縁破壊試験

当該発電機の絶縁破壊試験を第6.47図の回路で行った。巻回間の破壊検出には電圧平衡法、電流平衡法を用いた。



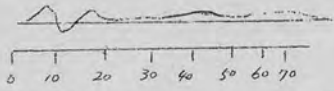
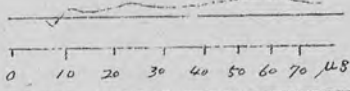



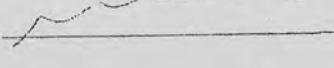

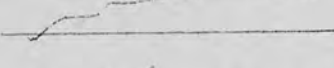


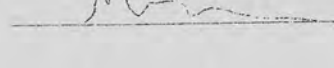



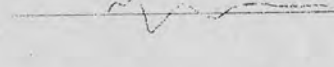
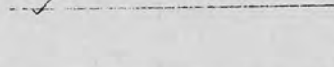

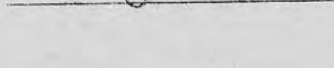

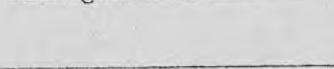
第6.47図 試験結線図

印加波は $(1.2 \times 32) \mu s$ で最初 $3000V$ 位でネオン管により短絡を行い検出感度を調べた。その時の検出波形を第6.48図に示す。

次に電圧を上げて絶縁破壊を行ったところ $3800V$ で巻回間が破壊し対地絶縁は $10kV$ で破壊した。その模様を第6.49図に示す。

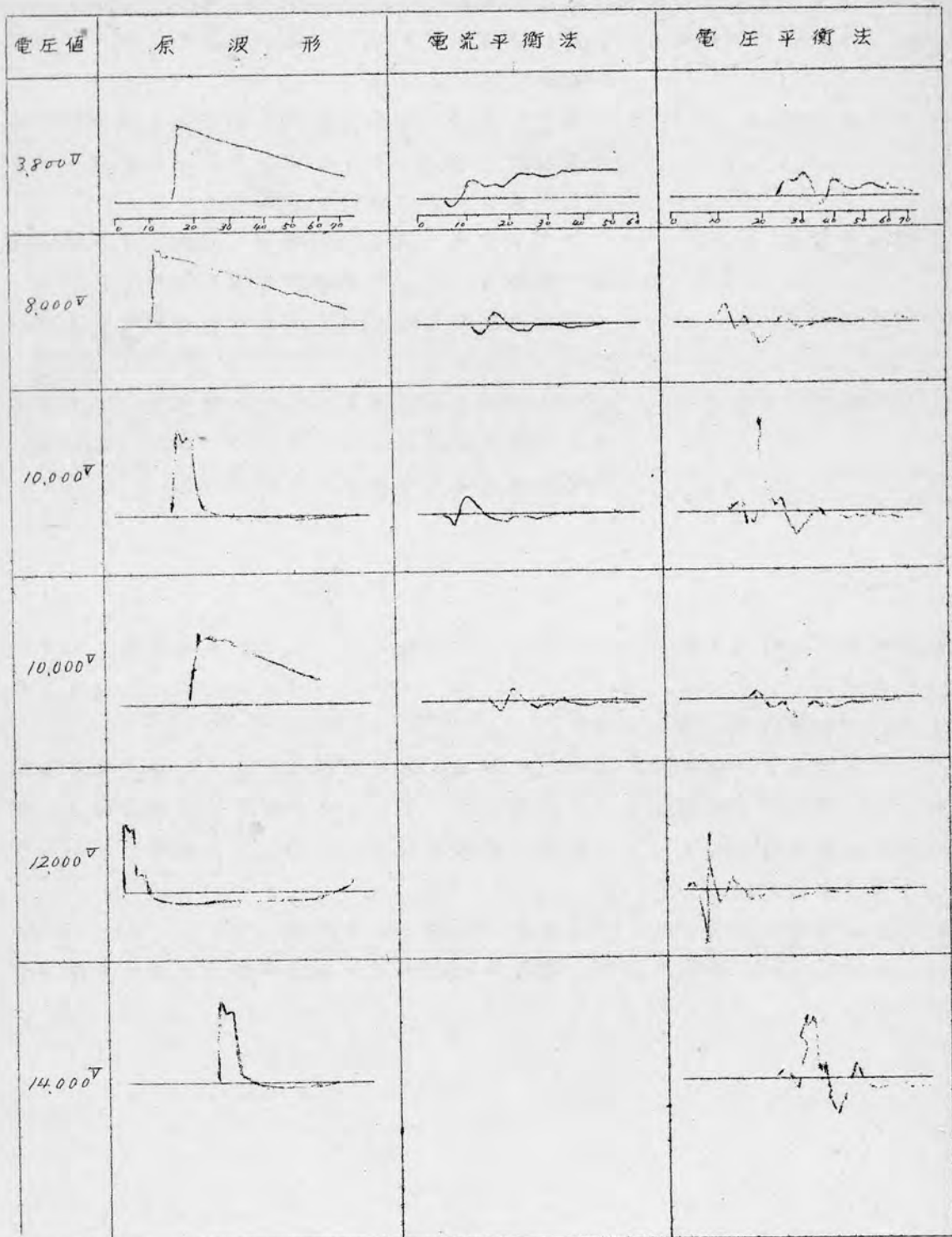
第6.48図 検出法の感度試験

(V相-U相)

試験 番号	短 路 所	検 出 形	
		電 圧 平 衡 法	電 流 平 衡 法
1	なし		
2	0-1		
3	1-2		
4	2-3		
5	3-4		
6	4-5		
7	5-6		
8	6-7		
9	7-8		
10	8-9		

第 6.49 回 絶縁破壊試験

(U-V相の分)



6.5.3 6.6kV、4375kVA 発電機

巻回固絶縁破壊の検出法を適用した結線図を示すと第6.50図である。この結線図は出力端子側に衝撃波を印加した場合である。検出法の取付け位置は

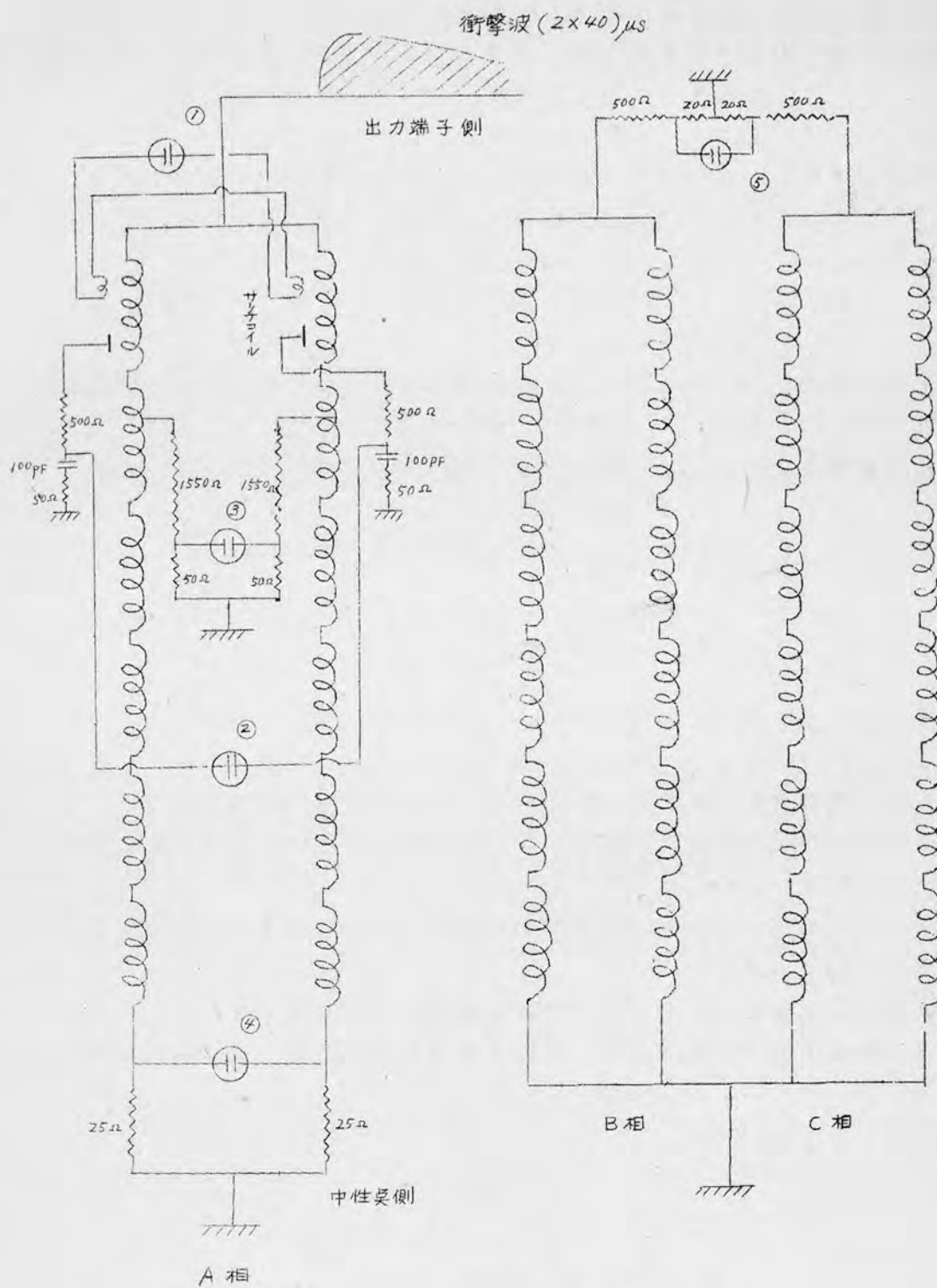
1. ~~サチコイル~~平衡法^{静電平衡}.....U相の右回り、左回り巻線の出力端子側より最初の線輪に取りつけた。
2. 平衡静電法.....U相の右回り、左回り巻線の出力端子側より3番目線輪の上側スロット出口に44平方厘の極板を用いて第6.50図の通りに結線した。
3. 電圧平衡法.....U相の出力端子側より4番目の線輪と5番目の線輪の継線に1600Ωの無誘導抵抗を取りつけた。
4. 電流平衡法.....U相の面巻線の中性点にそれぞれ無誘導抵抗25Ωを取りつけた。
5. 他相誘導による法.....V相、W相の中性点をそれぞれ接地し、出力端子側に無誘導抵抗520Ωを取りつけて、V相とW相へそれぞれの誘起電圧の差電圧を観測する。

破壊試験は出力端子側からまづ行い、その時のオッシログラムを第6.51図に示す。巻回間の破壊は260kVで、静電法、電圧法、電流法において検出され41.7kVで対地絶縁が検出される。

次に中性点側より衝撃波を印加して、絶縁破壊を実施した。その時の層間短絡の検出法は第6.50図と同じで、この場合~~サチコイル~~平衡法^{静電平衡}、平衡静電法、電圧平衡法を出力端子側より16番目の線輪ならびにその入口の継線に取りつけた。電流平衡法は中止した。

この時は巻回間は44kVで対地絶縁が破壊する迄破壊せず。

以上の結果より、静電平衡法、電圧平衡法および電圧平衡法の検出感度は良好であるが、~~サチコイル~~法^{静電平衡}は芳しくない。

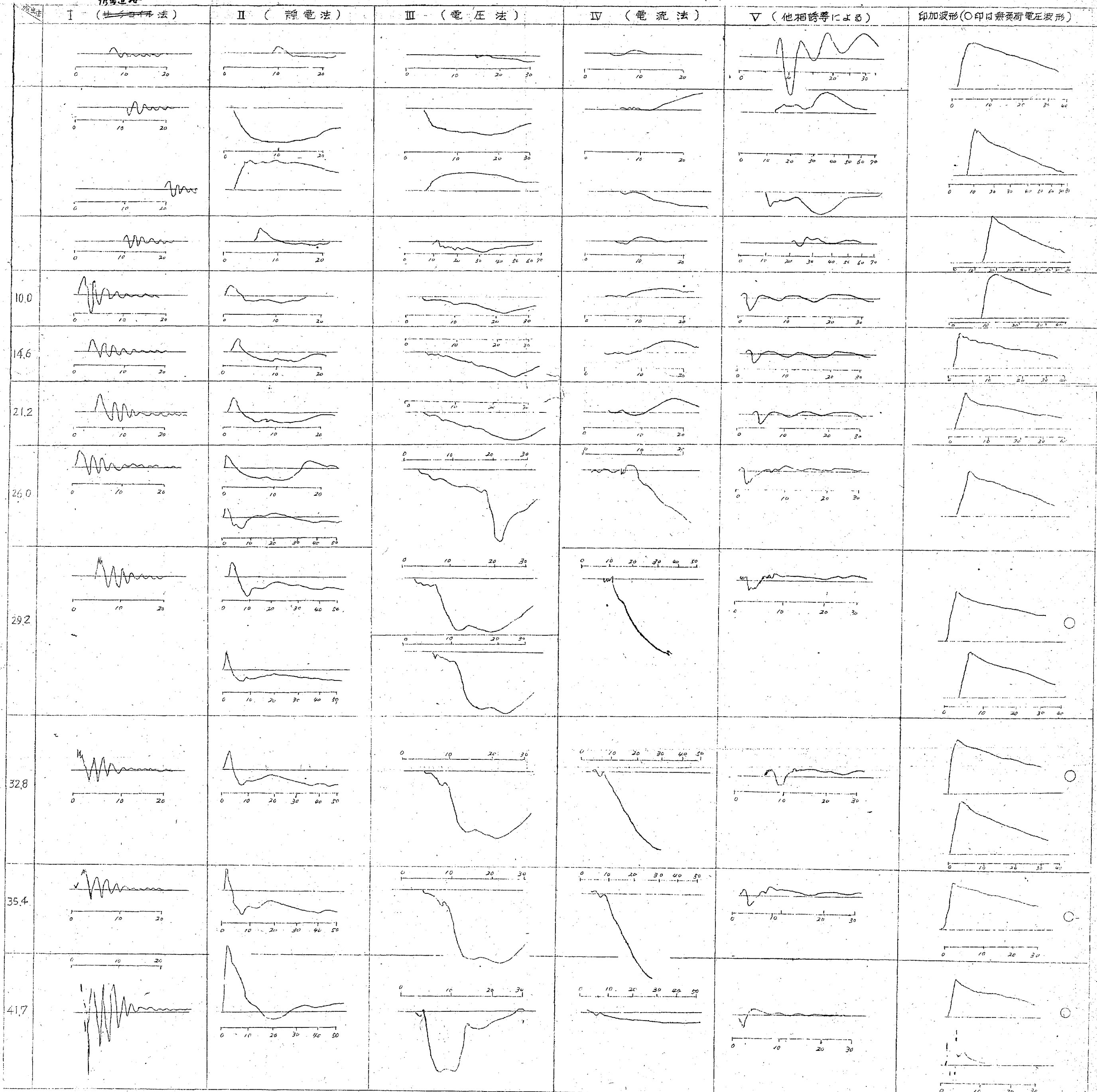


第6.50図 検出回路結線図

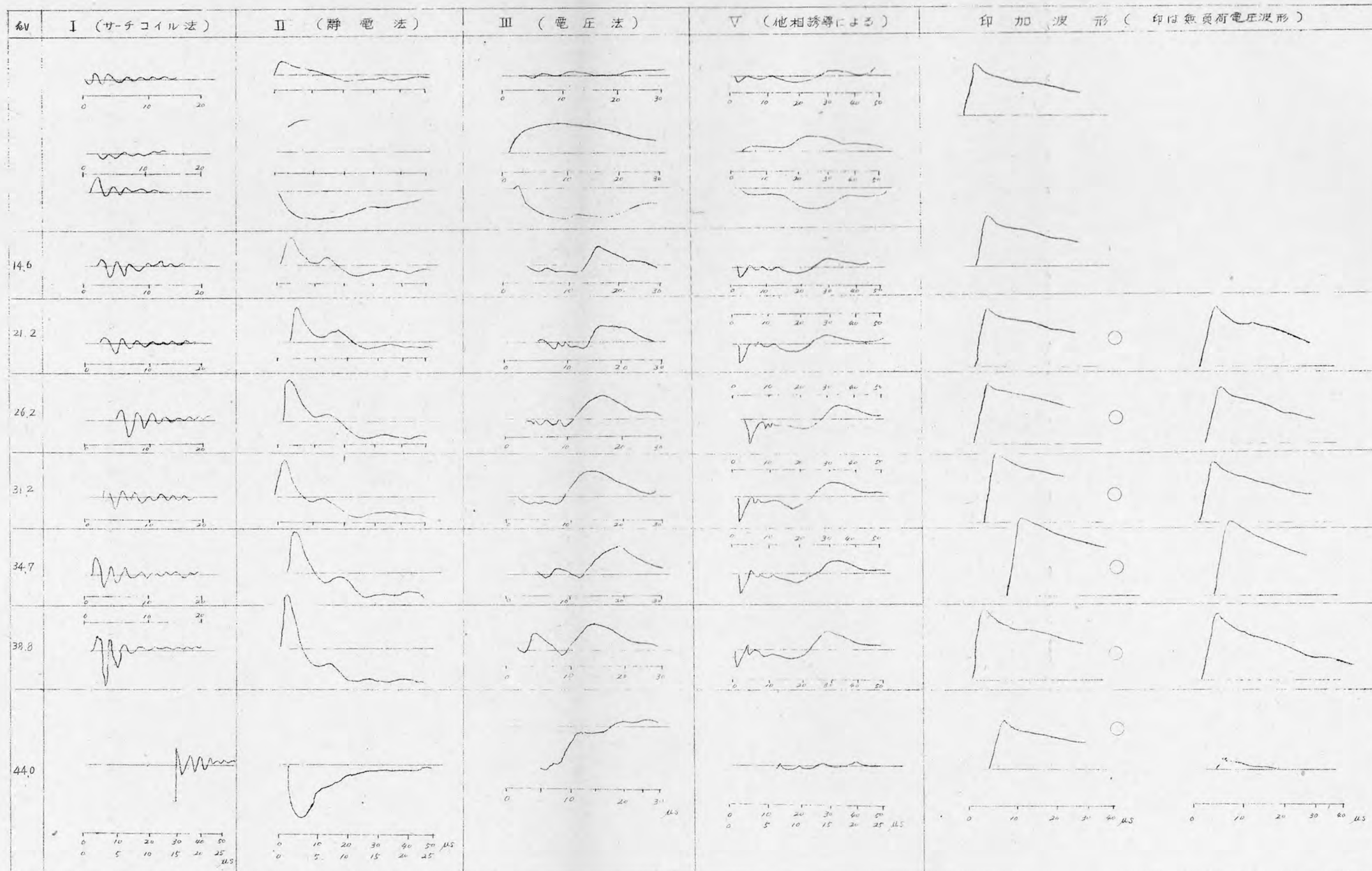
128 項欠

第6.51図

誘導電流



第 6.52 図



§ 6, 6 結 言

以上本章において論究して来たことを要約すると次の通りである。

1. 巻線ノ本を短絡した時の漏洩インダクタンスの減少の50~80%が巻回間を短絡した時の漏洩インダクタンスの減少となる。
2. 短絡による漏洩インダクタンスの減少の割合は、線輪配置にも関係する。発電機の巻線中のどの線輪を短絡しても漏洩インダクタンスの減少の割合は等しい。
3. 短絡により巻線の波動インピーダンスは減少するが、その減少は巻線の位置によつて異なる。また短絡により波頭の伝播速度は速くなる。
4. 短絡により巻線中の線輪対地電圧は変化する。短絡線輪より始端側の線輪対地電圧は降下し、終端側の対地電圧は上昇する。
5. 短絡により巻線の接地電圧は増加する。
6. 短絡の検出の原理としては
 - (i) 短絡による巻線の対地電圧の変化を検出する。
 - (ii) “ 巻線の波動インピーダンスの減少、すなわち接地電流の増加を検出する。
 - (iii) 漏洩インダクタンスの減少を検出する。
7. 検出法としては下記のものがある。
 - (i) 電 圧 法 {
 1. 電圧直接法
 2. 静電法
 - (ii) 電 流 法
 - (iii) ~~電磁誘導法~~ {
 1. ~~電磁誘導法~~ ^{電場}
 2. 他相誘導法
8. 検出感度を高めるために平衡法を採用する。
9. 電圧法、電流法の感度は極めて良好であるが、~~電磁誘導法~~の適用については今後の課題である。
10. 本研究においては短絡を完全なものとして論究したが、線輪の破壊は絶縁物の裂傷であるので、破壊後に僅かであるが抵抗分をもっていると考える。破壊後の抵抗分を考えた検出法の感度については今後研究する考えている。
11. 発電機に巻回間短絡保護継電器が最近とりつけられ、巻回間短絡による事故の拡大を防止するようになって来たが、巻回間短絡の箇所の検出を現場の人が行うことができる装置が必要になってくる。

134項欠

結 言

以上緒言と六章において 発電機に対し衝重電圧試験の必要性を説き発電機巻線の進行波の伝播特性、巻線の電圧分布、発電機の絶縁問題を17台の発電機に対する諸種の実験結果に基づいて論じ、発電機に対する最も合理的な衝重電圧試験の試験電圧、試験波形、さらに衝重電圧試験における巻回間絶縁破壊の検出法について述べて来た。したがって各章の論旨を要約すると次の通りである。

1. 発電機は電力系統上極めて重要な要素であるが、直接送電線路に接続されていない所から、雷および開閉サージに対する防護対策と発電機の基準衝重絶縁強度について等閑に附されていたが、近年回転機用避雷器および保護用蓄電器の設置要綱が制定され、現在適用されている。しかし、発電機の基準衝重絶縁強度はまだ判定されていないので、最も合理的な基準衝重絶縁強度を定める必要がある。

一方発電機の焼損事故のうち、巻回線の絶縁破壊によるものがその大半であるので、巻回間絶縁を強化する必要があるが、その基準を判定しなければならない。

以上二つの絶縁基準強度を満足しているかどうかを試験するために必要を試験法として衝重電圧試験が要求されるのである。

2. 回転子がない状態における発電機各相巻線の初期の波動インピーダンスは等しく、特に単層巻巻線では各相の過渡波動インピーダンス波形は大体等しい。厳密な意味においては各相巻線間、および同相線輪間の相互誘導が複雑に交錯しているので、各相巻線は平衡状態ではない。この点二層巻巻線において著しい。
3. 発電機巻線に多導線系回路の理論を適用した結果、単層巻巻線の発電機では零相分波動インピーダンスと正相分波動インピーダンスが等しいので、巻線が過渡波動インピーダンスとして取扱われる間では各相巻線は単一回路として扱うことができる。この点に関しては各相巻線間の結合係数が極めて小さいことから知ることができる。これは初期において進入波の波頭が急峻な場合は鉄心を通る磁束が鉄心の表皮効果のため抑制されるためである。
4. 二層巻巻線発電機においては溝内に異相の線輪が納まっているので、巻線内には部分的に他相巻線との相互インダクタンス誘導係数が存在し、単層巻巻線とは異なっている。二層巻発電機では零相分波動インピーダンスが正相分より幾分小さい。これは零相分回路における各相巻線間の相互インダクタンスが負の符号として作用するからであって、各相間の相互インダクタンスの作用および相互インダクタンスと誘導係数の分布が局部的であること、同相内線輪間に相互インダクタンスを有しているので、送電線の進行波伝播特

性とは異なったものになる。巻線方式により過渡波動インピーダンス波形は変化する。

- 5 回転子巻線の端子を短絡・開放しても固定子巻線の過渡波動インピーダンスは変らない。
- 6 過渡波動インピーダンス波形の初期の波頭は、急峻な進行波に対しては、鉄心の表皮効果も考えられるが、線輪の一巻回線の実効インダクタンスと数 $PF \sim$ 数 $+PF$ の対地静電容量とが作用する。一般には発電機巻線は波動インピーダンスに等しい抵抗と等価的に考えられる。
- 7 回転子が挿入されている状態では巻線の初期波動インピーダンスは回転子がない状態より $10 \sim 20\%$ 大きくなる。制動巻線は逆に波動インピーダンスを減少する方向に働く。
- 8 線輪は固定子溝に納まっているので、波頭の歪みおよび減衰は大きい。回転子磁極が存在するとなお大きくなる。
- 9 回転子巻線に誘起する電圧は初期においては回転子磁極間に位置している固定子巻線よりの磁束により、大体巻線の始端電圧の 5% 程度の電圧が誘起される。時間が経過するにつれて、波頭が歪み減衰してくると、磁極鉄心の表皮効果は減少するので、長波尾長の進行波においては磁極に面した固定子巻線の磁束により電圧が誘起され、その電圧は始端電圧の 2.5% に達することもある。制動巻線は初期の回転子巻線の誘起電圧を抑制する効果がある。
- 10 発電機巻線において相互インダクタンスを無視出来る場合は線輪を梯子型オシロスコプの四端子回路とし、巻線をその縦続回路として求めた線輪端子の対地電圧、分担電圧は実測結果とよく一致する。しかし、実際の発電機、特に二層巻発電機では異相巻線間、同相線輪間の相互インダクタンスがあるので、複雑な回路となる。
- 11 巻線の線輪対地電圧および分担電圧に対する回転子磁極の反響の影響は、その位置によってことなるが、回転子磁極による漏洩インダクタンスの変化、磁極の鉄心の表皮効果による大きい変化はみられない。
- 12 印加波の波頭峻度が急峻な程、巻線の中程にある線輪の対地電圧は高くなる。また線輪分担電圧は侵入波の波頭峻度により変る。すなわち波頭長が短い程、線輪の分担電圧は大きい。波頭長対巻回分担電圧はオシロスコプ 4.44 図に示す曲線となる。
- 13 組み立てられた発電機巻線中の線輪の巻回分担電圧は線輪分担電圧を巻回数で除した値である。
- 14 各相巻線あるいは二重以上の星形結線のそれぞれの分岐巻線の対地電圧、および分担電圧は一致していない。したがって巻回同検出に平衡法を適用するに際しては、どの程の不均衡があるかを知ることが必要である。また接地電流の波形も同一でない。

- 15 巻線を進捗する進行波の波頭は、固定子鉄心の表皮効果による変歪および減衰が大きい。減衰による終端電圧の減少は発電機巻線の直長等も関係するので一概にはいえぬが、始端電圧の10～20%である。
- 16 発電機の絶縁強度は下記の通りに考える。

発 電 機	対 地 絶 縁		巻 回 間 絶 縁 衝垂波(巻回間電圧 $\times\sqrt{2}\times 1.25$)に対し
	商用周波	衝垂電圧	
旧品発電機	$(2E+2)\text{kV}\times 1.1$	制限電圧 $\times 1.1$	40倍
新品発電機	" $\times 1.65$	" $\times 1.65$	100倍(A種絶縁) 200倍(B種絶縁)

註 Eは定格電圧

- 17 回転機用避雷器の制限電圧をベースとして試験電圧を定めたのが下記の表である。

公称電圧(kV)	試験電圧(kV)
3	25(20)
6	35
10	55
12	65
15	80

- 18 発電機衝垂電圧試験において巻回間絶縁の強度を確かめるためには試験波形を $(3\times 40)\mu\text{s}$ とするのが妥当である。波頭長の裕度は3～3.5 μs である。
- 19 巻回間短絡を検出するには、短絡による、
- 1 巻線の対地電圧の変化
 - 2 巻線の接地電流の増加
 - 3 巻線の漏洩インダクタンスの減少
- を検出して行う。
- 20 検出法として下記のものがある。
- 1 電 圧 法
 - 1 電圧直接法
 - 2 静電法
 - 2 電 流 法
 - 3 誘 導 法
 - 1 誘導直接法
 - 2 他相誘導法
- なお検出感度を上げるためには平衡法を適用すべきである。
- 21 今後の課題として、誘導法の適用方法の改善と感度の向上、さらには破壊点に抵抗分をもっていると考えられるので、その場合の検出感度の向上がある。

本報告を終るに当り、御指導と御鞭撻とを賜わった当所電力部長、富山順二、回転機衝電圧試験標準規格調査委員会において御指導を賜わった東京大学教授藤高周平、電気試験所検査部長工学博士法貴四郎、明治大学教授大槻喬、慶応大学教授森元吉外委員各位に対し御礼申し上げます。

なお本論文を纏めるに当って種々御指導を賜わり、特にオニ京大法による発電機巻線のインダクタンス、インピーダンスに關してはいろいろ御教授を賜わった京都大学教授林重憲氏に謝意を表する。

本研究に必要な発電機の衝電圧試験のデータは旧日本発送電、水力課再編成後においては東京電力、東北電力、関西電力、および四国電力の水力関係者の御好意と、現場の方々の御協力によるものである。また実測およびデータの整理には当研究所電力部機器係の所員各位の御支援に候つ所が大である。ここに謝意を表する次第である。

参 考 文 献

1. 発送電衝電防止専門委員会 : 協同研究 オ6巻 6号 (昭和26年)
2. " " " " オ5巻 4号 (昭和25年)
3. 萩野哲士 : 水車発電機事故に關して、電学誌 73巻 1057頁
昭和28年10月
4. 佐藤勇吉 : サージアスローバと発電機事故について 電学誌 73巻
1086頁 昭和28年10月
5. C. C. Skutt : T. A. I. E. E. Vol. 51 1932. P. 424
6. 楠瀬康雄 : 電力 34巻 6号 昭和25年6月
7. 日月敏次著 電氣絶縁ワニス及ゴムパウンド
8. 富山 上之園 : 電学誌 73巻 1083頁 昭和28年10月
9. J. F. Calvert : "Protecting machines from line surges"
T. A. I. E. E. Vol. 53. 1934. P. 139.
10. E. Friedländer : "Travelling waves in High-Voltage
Alternator windings" Journal I. E. E. Vol. 89 1942.
Part II P. 492
11. B. C. Robinson : "The Propagation of Surge Voltages
through High-Speed Turbo-Alternators with Single-
Conductor Windings." Journal I. E. E. Vol. 100. 1953
Part II. P. 453
12. E. W. Boehne : "Voltage Oscillations in Armature Windings
Under Lightning Impulses". I. I. E. E. Vol. 49. 1930.
P. 598.
13. E. M. Hunter : "Transient Voltages in Rotating Machines"
E. E. Vol. 54. 1935. P. 599

14. 林、岩本 : インテリシヤル、インピーダンス並びにインピーダンス函数の測定法とその応用 電気評論 38巻 8号 昭和25年
15. 林、奥田 : 電気機器巻線上の電位振動におよぼす鉄心中の表皮効果の影響 電学誌 74巻 1368頁 昭和29年11月
16. F.D. Fielder & E. Beck : Effects of Lightning Voltages on Rotating machines and Methods of Protecting Against them. T.A.I.E.E. Vol. 49. 1930. P. 1577
17. W. J. Rudge, E. M. Hunter & R. W. Wiseman : Protection of Rotating A-C Machines Against Travelling-wave Voltages Part 1 : G.E. Review Vol. 41. 1938. P. 101.
18. 大河内重助、進行波に依り電機子巻線に生ずる電圧分布 電学誌 54巻 1237頁 昭和9年12月
19. 大槻、原田、上之園 : 発電機衝重電圧試験, 電気三学会 才26回連合大会, 昭和27年5月
20. 電機工業会 : 回転機衝重電圧試験標準規格調査委員会小委員会資料 No. 4
21. 大槻 : 発電機コイルの層間衝重電圧分布 (中間報告) 回転機衝重電圧試験規格調査委員会資料 No. 55
22. 回転機衝重電圧試験標準規格調査委員会小委員会資料 No. 8 発電機ステータコイル,
23. P. L. Bellaschi : Surge Characteristics and Protection of Generators : C1
24. 上之園、福田 : 運転中の発電機に対する絶縁診断としての交流耐圧試験について : 電研月報 Vol. 4. No. 4 P. 8 昭和29年
25. Edward Beck : W. H. Engineer 1949. 5月
26. 三浦 : 平衡法による変圧器の故障検出, 日立評論 昭19年
27. 森 : 実用新案出願才3620号
28. 毛利 : 変圧器衝重電圧試験に於ける故障検出
29. 井上 : 回転機の衝重電圧試験及び層間絶縁試験に於ける故障発見法 : 回転機衝重電圧試験標準規格調査委員会小委員会資料 No. 2

240 項欠

附 録

才1章 発電機巻線のインディシャル・インピーダンスの測定回路ならびにその原理

才2章 発電機巻線のインディシャル・インピーダンス

§ 2. 1	3,450v	400kVA	発電機のインディシャル・インピーダンス	
§ 2. 2	6,600v	1,500kVA	"	"
§ 2. 3	3,450v	720kVA	"	"
§ 2. 4	11,000v	11,000kVA	"	"
§ 2. 5	3,450v	2,800kVA	"	"
§ 2. 6	11,000v	20,000kVA	"	"
§ 2. 7	11,000v	1,000kVA	"	"
§ 2. 8	11,000v	15,000kVA	"	"
§ 2. 9	6,600v	4,375kVA	"	"
§ 2. 10	3,300v	40kVA	"	"

才3章 発電機巻線の波動インピーダンス

才4章 巻線の電圧分布

才5章 回転子巻線への誘起電圧のオツシログラム

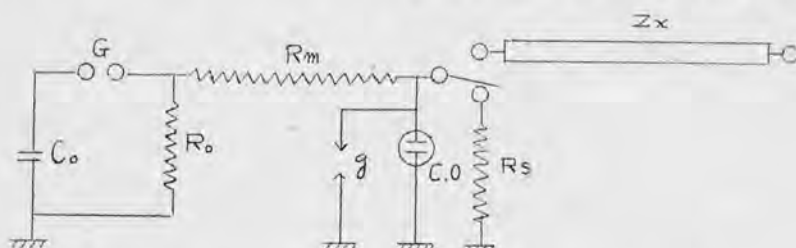
才6章 短絡による対地電圧および負担電圧の变化

附 録

第 1 章	発電機巻線のインテシマル・インピータンスの測定回路ならびに その原理	(242)
第 2 章	発電機巻線のインテシマル・インピータンス	(244)
§ 2・1	3,450 V, 400 KVA 発電機のインテシマル・インピー タンス	(244)
§ 2・2	6,600 V 1,500 KVA	(257)
§ 2・3	3,450 V 720 KVA	(267)
§ 2・4	11,000 V 11,000 KVA	(270)
§ 2・5	3,450 V 2,800 KVA	(282)
§ 2・6	11,000 V 20,000 KVA	(288)
§ 2・7	11,000 V 1,000 KVA	(292)
§ 2・8	11,000 V 15,000 KVA	(301)
§ 2・9	6,600 V 4,375 KVA	(304)
§ 2・10	3,300 V 40 KVA	(312)
第 3 章	発電機巻線の波動インピータンス	(326)
第 4 章	巻線の電圧分布	(326)
第 5 章	回転子巻線への誘起電圧のオシログラム	(337)
第 6 章	短絡トキ対地電圧および対地電圧の变化	(346)

第1章 発電機巻線の過渡波動インピーダンスの測定回路ならびにその原理

過渡波動インピーダンスは矩形波の単位函数的な強制電流に対する応答電圧を与えられるものであり、これが測定には第二京大法を使用した。その測定回路を図示すると第1.1図の通りである。この回路において C_0 は充電用コンデン



第1.1図 第二京大法による測定回路

サー、 G は放電開閉、 R_0 は放電抵抗、 R_m は漏洩静電容量の小さい高抵抗、 Z_x は測定すべき未知のインピーダンス、 R_s は Z_x と同程度の大きさを有する標準無誘導抵抗、 C_0 は高速度スラウソップの偏向板、 g は C_0 に高電圧を与えないための保護用火花開閉である。

衝撃電圧発生装置の内部インピーダンス函数を $Z_m(p)$ とし、これに標準インピーダンス函数 $Z_s(p)$ を接続し、衝撃電圧発生器を動作させて、その出力電圧 $V_s(p)$ を測定し、次に未知のインピーダンス函数 $Z_x(p)$ に接続し換えた時のその出力電圧を $V_x(p)$ とすると、この2回の測定から未知のインピーダンス函数 $Z_x(p)$ は次式から求められる。すなわち、

$$Z_x(p) = \frac{V_x(p)}{V_s(p) + \frac{Z_s(p)}{Z_m(p)} [V_s(p) - V_x(p)]} Z_s(p) \quad (1.1)$$

$|Z_s(p)| \ll |Z_m(p)|$ の条件が満足される場合は(1.1)式は(1.2)式の如くなる。すなわち、

$$Z_x(p) \doteq \frac{V_x(p)}{V_s(p)} Z_s(p) \quad (1.2)$$

完全なる矩形波の単位函数的な強制電流を得ることは実際問題として不可能であるが、衝撃電圧発生器の構成素子を適当に選定すれば、オシログラフの測定時間域内で、内部インピーダンス $Z_m(p)$ を純抵抗と等しくすることができる。したがって測定時間域および時間的な分解能を逸脱した所は、必ずしも $Z_m(p)$ は純抵抗である必要はない。また標準インピーダンス $Z_s(p)$ も同様に純抵抗に近くすることができる。かかる場合に、

$$\frac{R_m}{R_s} = m - 1 \quad (1.3)$$

(1.3)式中の m をオシログラフの分解誤差率の逆数より大きくとると

すなわち、

$$m \ll 1 \quad \dots \dots \dots (1.4)$$

なる条件が満足される場合には特殊測定法が可能となる。

1. 直描法

衝撃電圧発生器の内部定数、出力電圧を適当に選べば $V_s(p)$ を純抵抗 R_s と考えることができる。したがってその時間域においては $v_s(t)$ が矩形波と考えられる場合で、 $V_s(p) = V_s$ 、 $R_s(p) = R_s$ とおくと、(1.1)式は

$$Z_x(p) = \frac{V_x(p)}{V_s + \frac{R_s}{R_m} [V_s - V_x(p)]} R_s \quad \dots \dots \dots (1.5)$$

(1.4) の条件がある場合は (1.5) 式は (1.6) 式の如くなる。
すなわち、

$$Z_x(p) \doteq \frac{V_x(p)}{V_s} R_s \quad \dots \dots \dots (1.6)$$

(1.6) 式はオッシログラフに現われた $v_x(t)$ を以て直接過渡波動インピーダンス $Z_x(t)$ を表していることを示している。したがって
(1.6) 式は (1.7) 式と書くこともできる。すなわち

$$Z_x(t) \doteq \frac{v_x(t)}{V_s} R_s \quad \dots \dots \dots (1.7)$$

2. 積分補正測定法

衝撃電圧発生器の内部定数を適当に選べば、 $V_s(p)$ が $V_s/(p+\alpha)$ となる場合で、この時間域においては $v_s(t) = V_s e^{-\alpha t} H(t)$ となる。この状態は上述した直描法の条件が満足されない場合に起るものである。したがって、
(1.5) 式は (1.8) 式となる。すなわち

$$Z_x(p) = \frac{V_x(p)}{V_s} \left(1 + \frac{\alpha}{p}\right) R_s \quad \dots \dots \dots (1.8)$$

したがって

$$Z_x(t) = \frac{1}{V_s} \left[v_x(t) + \alpha \int_0^t v_x(\tau) d\tau \right] R_s \quad \dots \dots \dots (1.9)$$

以上述べた第二京大法の原理に基づいて、筆者はその適用に当っては衝撃電圧発生器の回路定数ならびに出力電力に留意し、直描法が適用されるようにした。測定における回路定数等はその都度述べることにする。

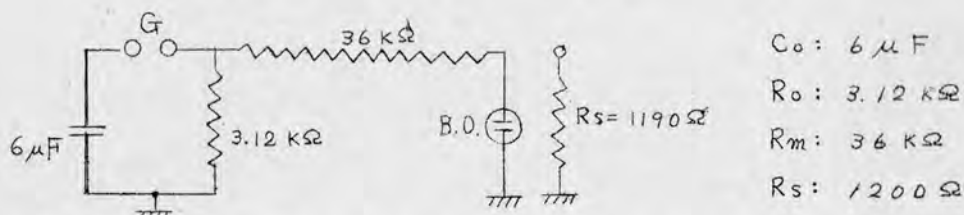
次に第二京大法による発電機巻線の過渡波動インピーダンス測定の試験ケースは本文第2.1表に示した通りで、主としてP、QおよびRケースについて実験を行った。

第2章 発電機巻線の過渡波動、インピーダンス

§2.1 3450V, 400KVA 発電機の過渡波動インピーダンス

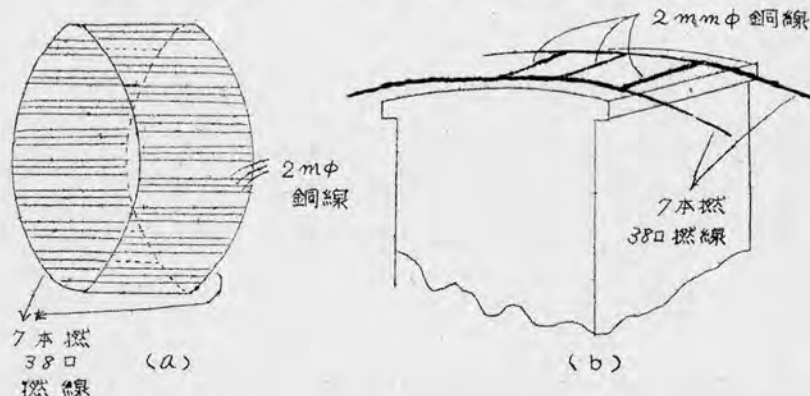
測定回路は第2・1図の通りで、各相巻線の過渡波動インピーダンスオシログラムは第2・3図、第2・4図および第2・5図に示す。第2・3図は回転子が挿入されている場合、第2・4図は模擬制動巻線（第2・2図参照）を附した

第2・1図 測定回路



場合、第2・5図は回転子を取り除いた場合の固定子巻線各相に対するオシログラムである。

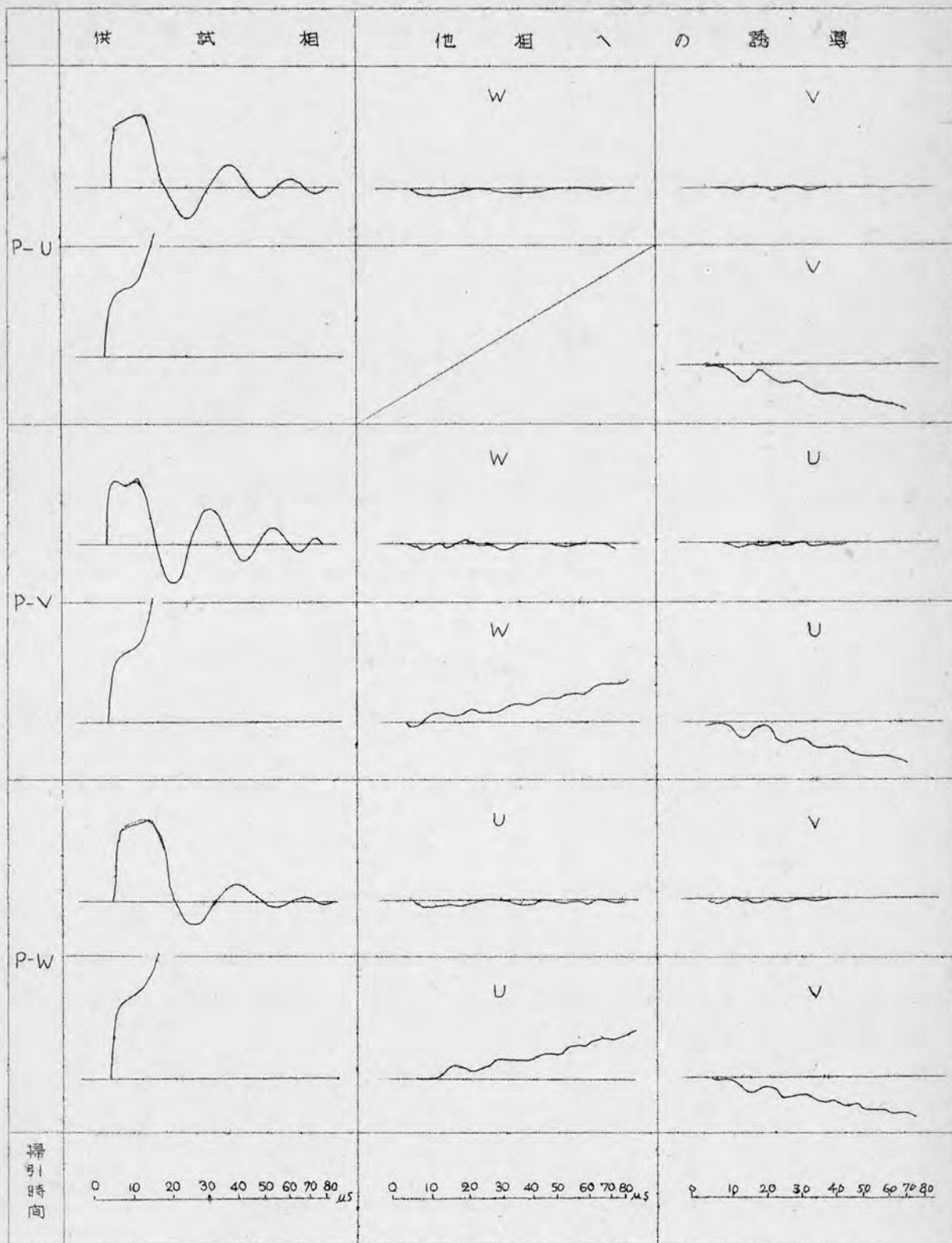
第2・2図 模擬制動巻線の構造



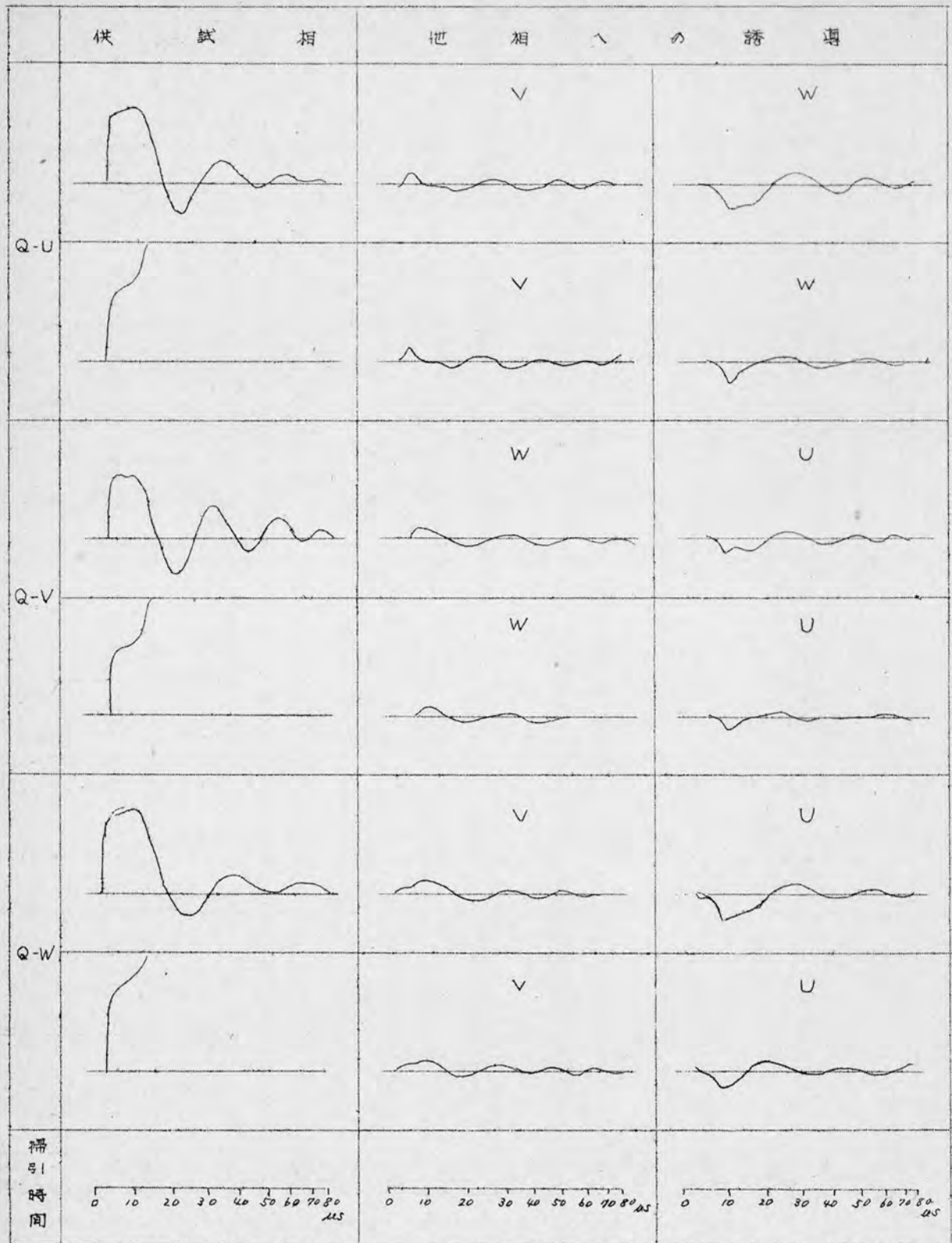
回転子がある場合、模擬制動巻線を付した場合および回転子を取り除いた場合のPケースの各相の過渡波動インピーダンス 一目瞭然分るように図示したのが第2・6図である。

第2・3図 (その1) (P-Case)

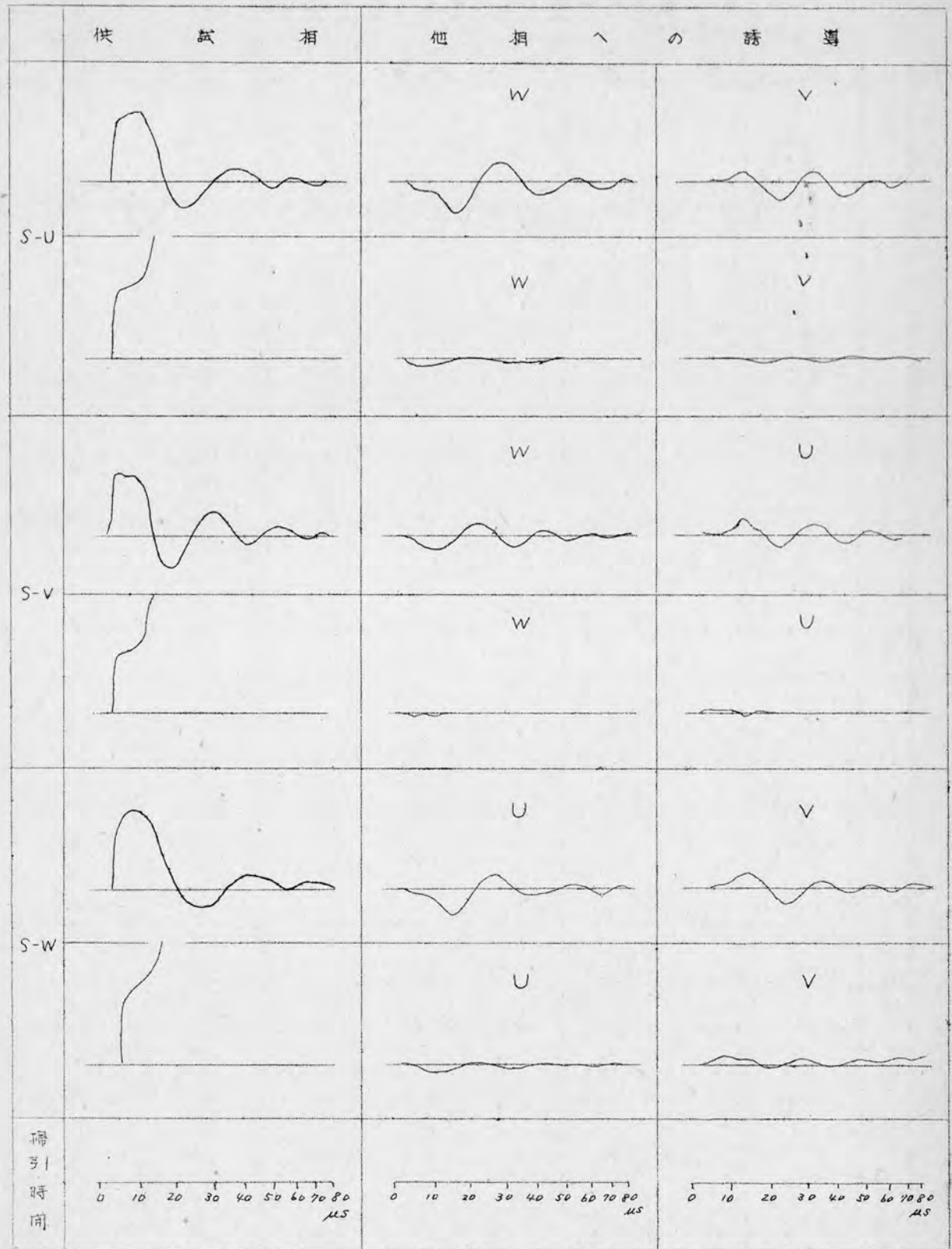
3450V, 400KVA 回転子有



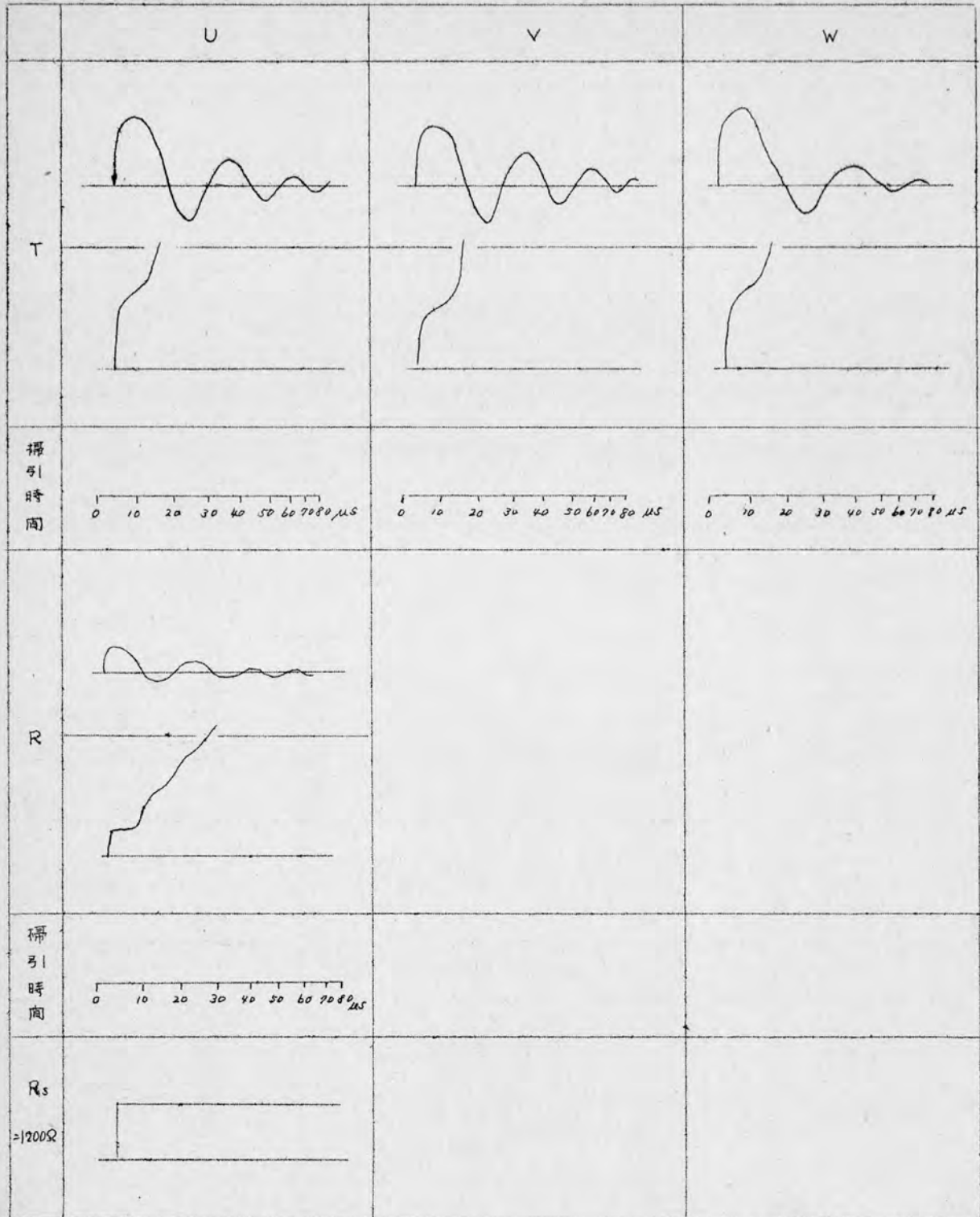
第 2 ・ 3 図 (その 2) (Q - Case)



第 2・3 図 (その 3) (S-Case)

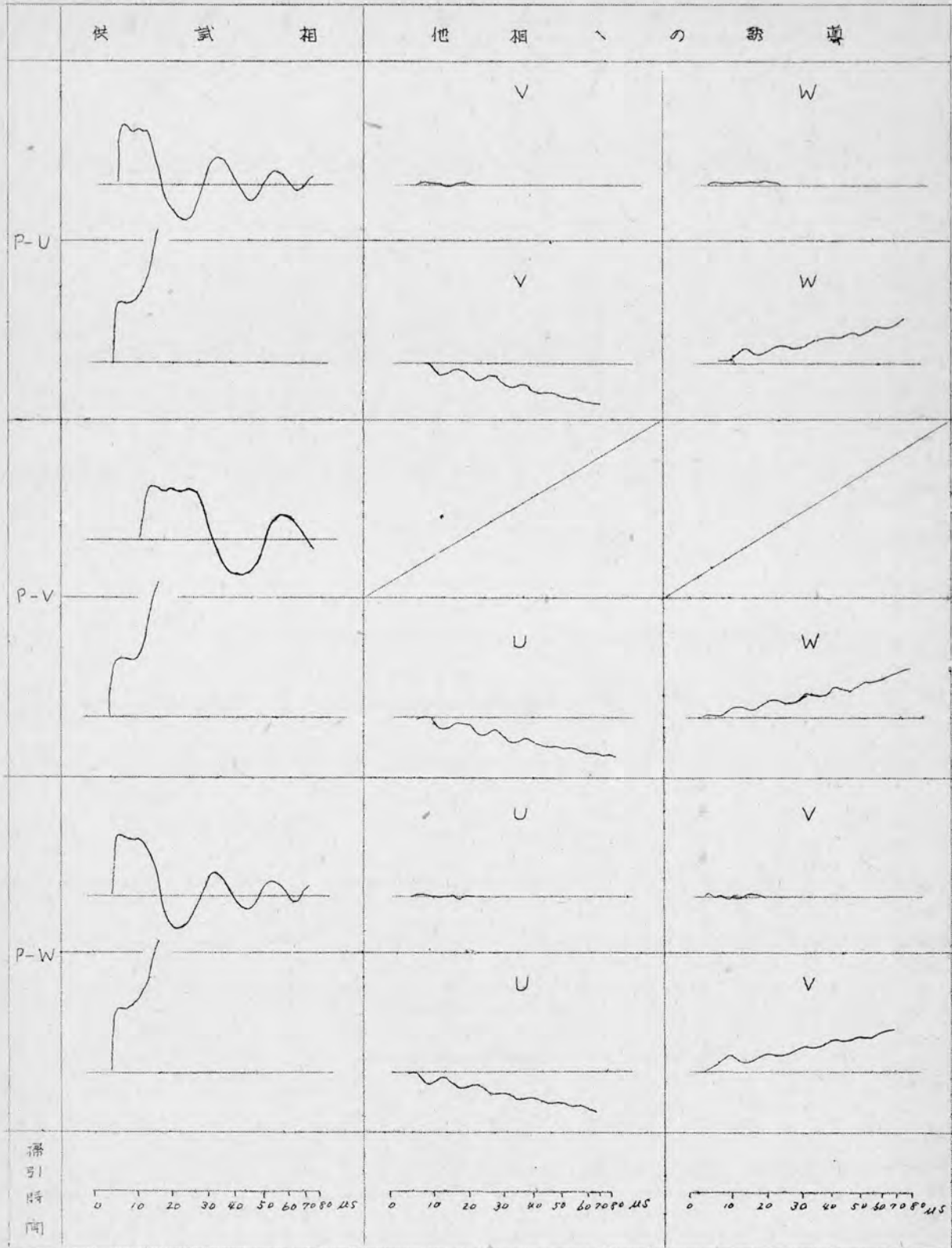


第 2・3 図 (セの女) (T, R case)

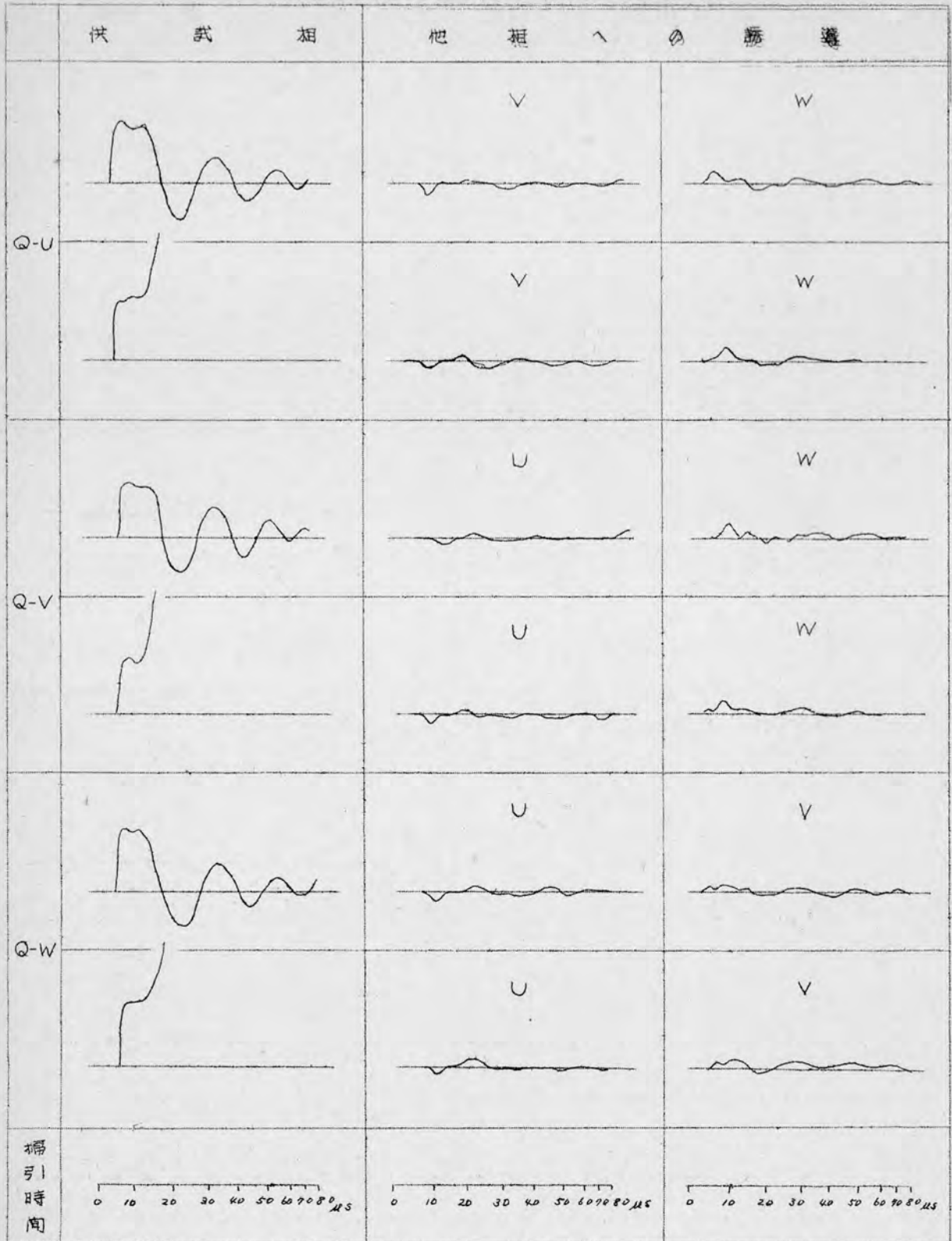


第 2・4 図 (その 1) (P-Case)

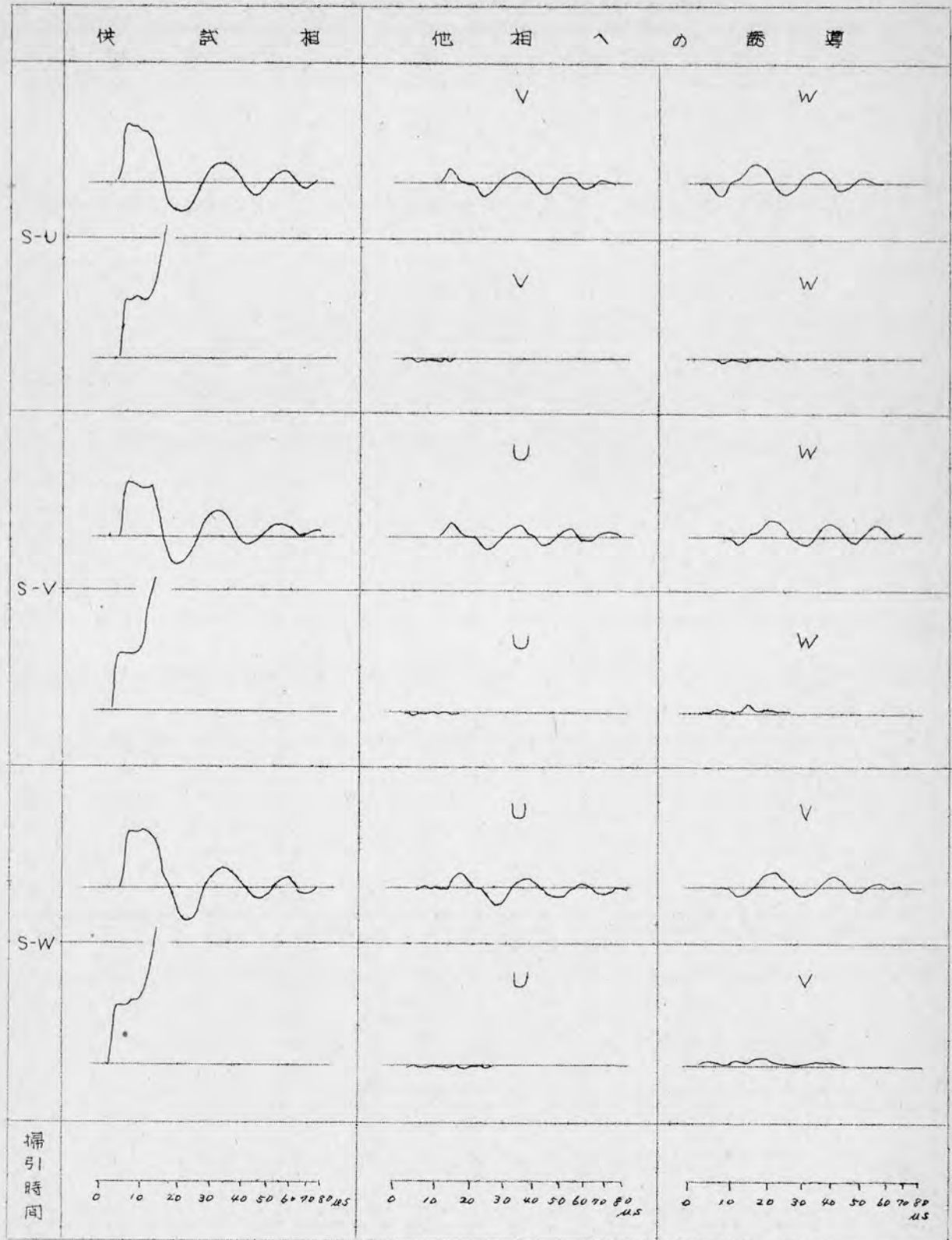
3450 V. 400 KVA 模擬制動巻線有



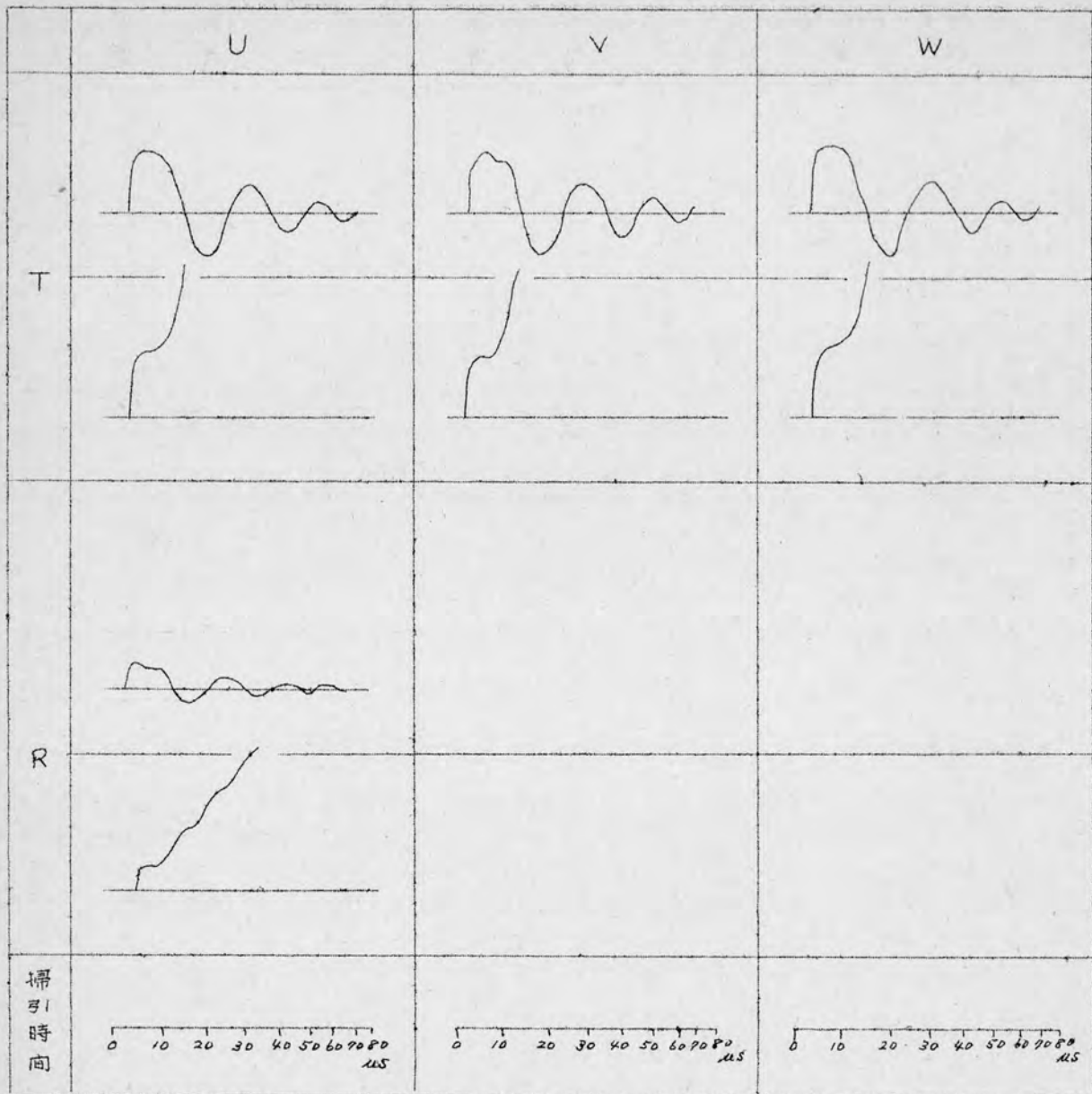
第 2 · 4 圖 (セロリ) (Q = Case)



第 2・4 図 (その 3) (S-Case)

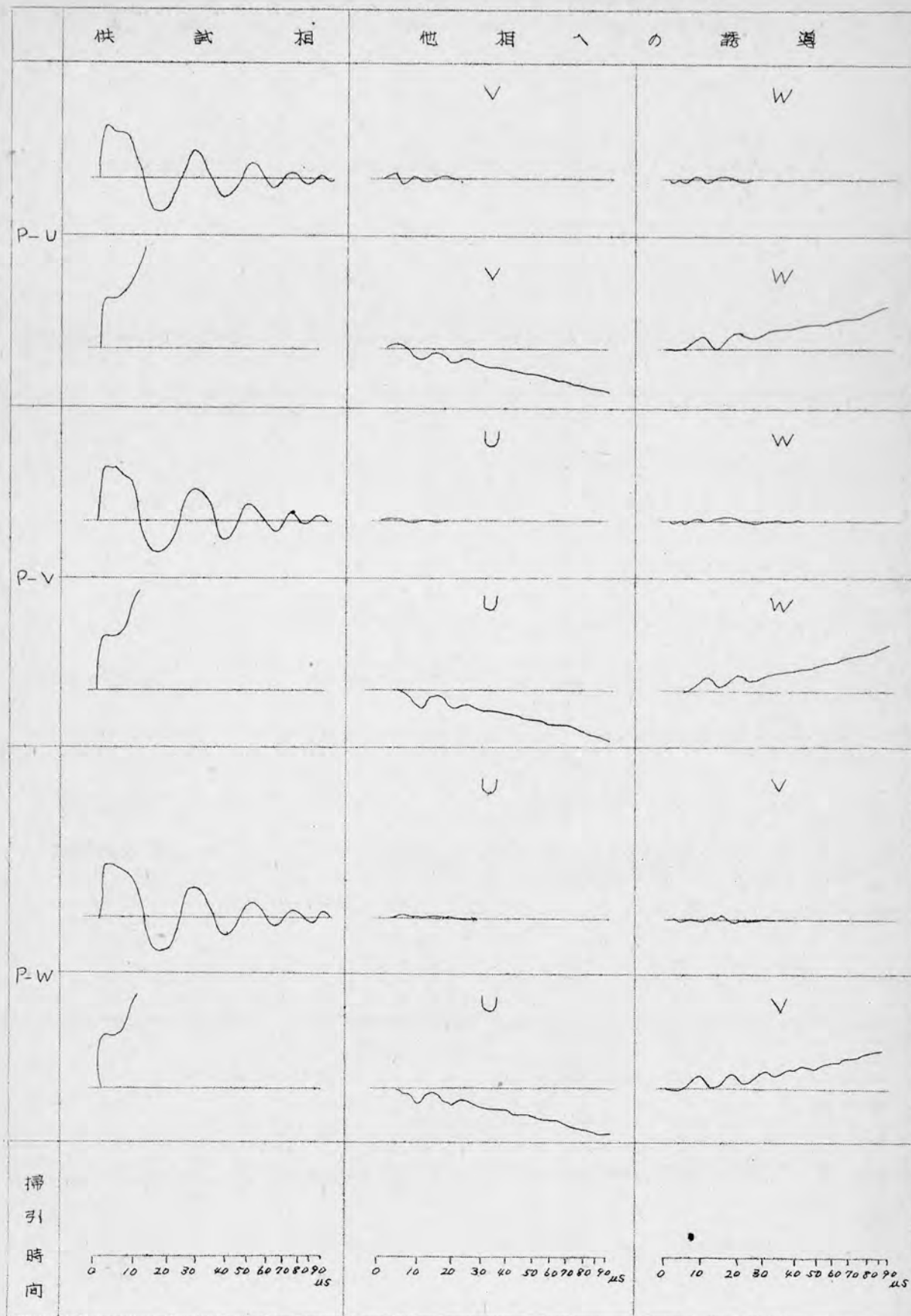


第2・4図(その4)(T. R-Case)

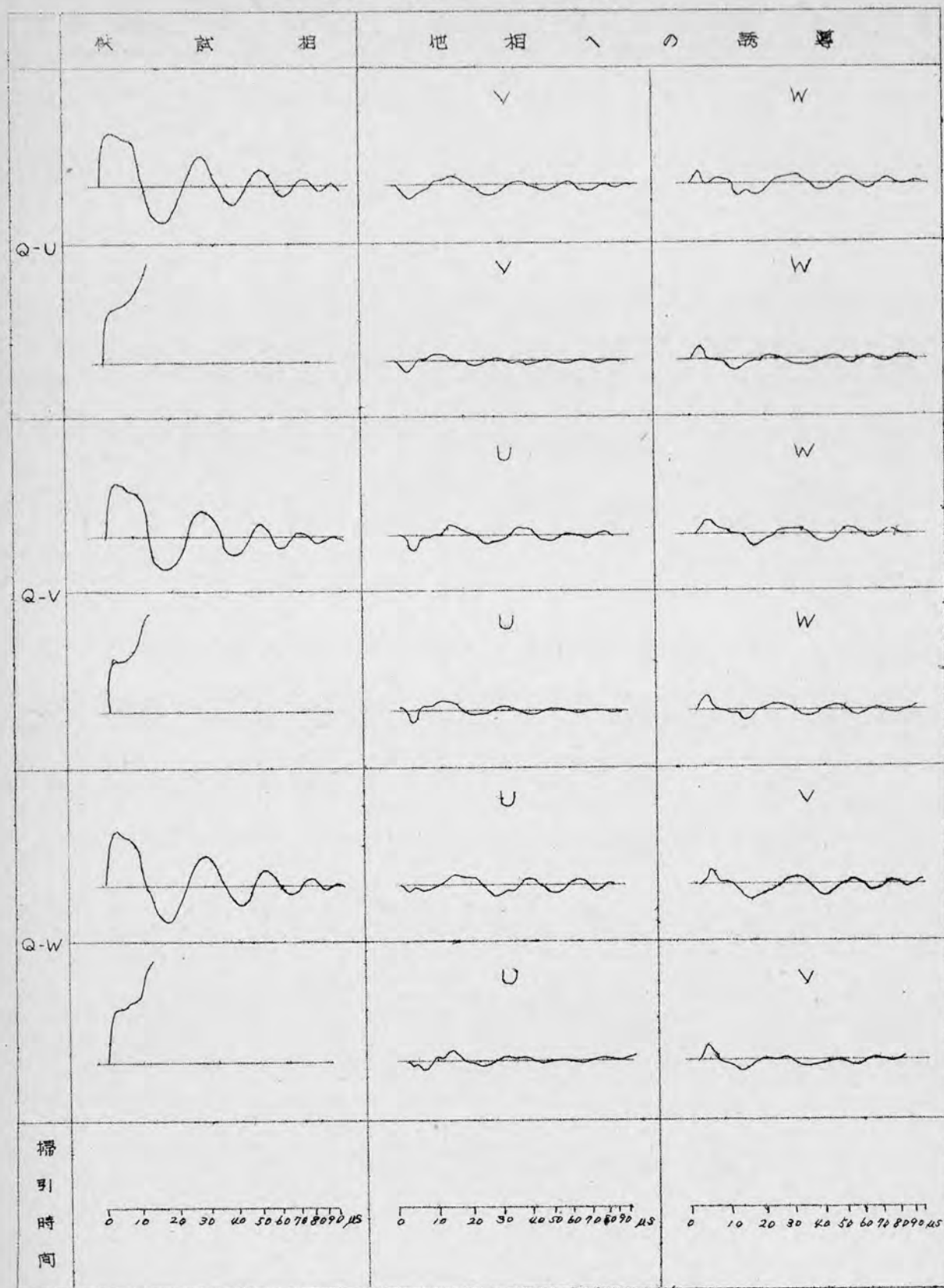


第2・5図 (その1) (P-Case)

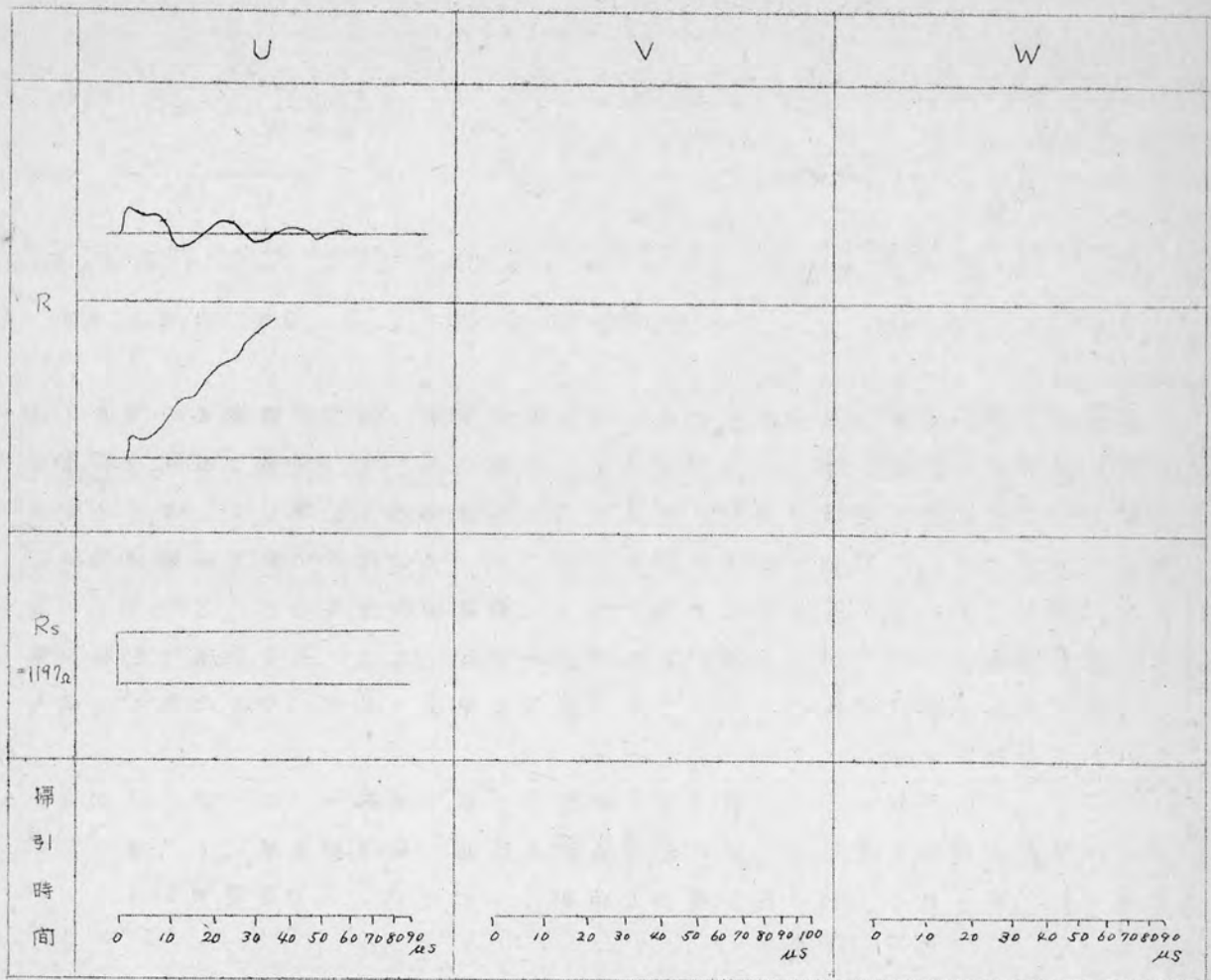
3.450V, 400kVA 回転子無



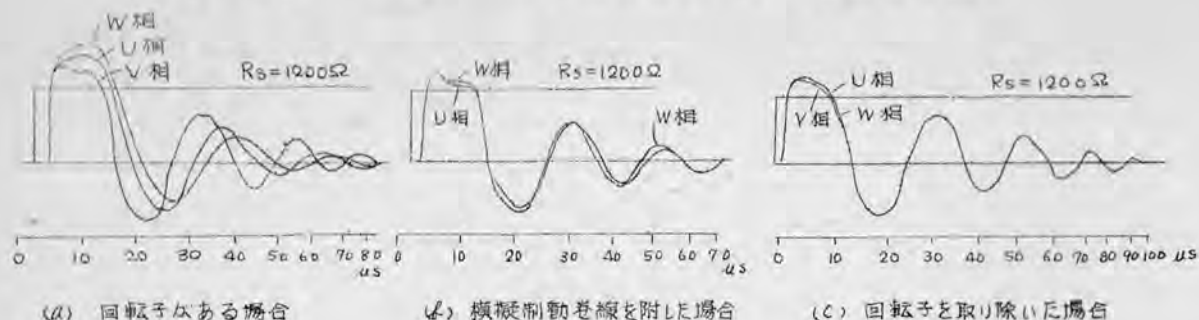
第 2 ・ 5 図 (その 2) (Q - Case)



第 2 ・ 5 図 (その 3) (R - Case)



第2-6図 試験ケースPにて回転子の影響による比較



回転子が挿入されている状態において回転子磁極と固定子線輪との関係位置は第3章第3・2節 第3・2図に図示した通りで、W相線輪は磁極の前面に位置し、U相線輪は磁極の端部に、V相のそれは磁極間に位置していることから第2・6図(a)の各相の過渡波動インピーダンス波形が回転子磁極の存在により相違していることが考えられる。さらに模擬制動巻線を付したただで、各相の過渡波動インピーダンス波形が大体同一波形となり、また回転子を取り除いた時の各相の過渡波動インピーダンス波形は第2・6図(c)に示した如く大体同じ波形である。

さらに三つの試験ケースにおける各試験ケースの波動インピーダンスおよび印加相巻線の終端を接続した時の固有振動の周期、周波数を表にして示したのが第2・1表である。この表に掲げた波動インピーダンスは過渡波動インピー

第2・1表

試験 ケ ー ス	供 試 相	回転子がある場合			模擬制動巻線を有する場合			回転子がない場合		
		波 動 インピーダンス (Ω)	1/4 波長 周 期 (μs)	1/4 波長 振 動 数 (KC)	波 動 インピーダンス (Ω)	1/4 波長 周 期 (μs)	1/4 波長 振 動 数 (KC)	波 動 インピーダンス (Ω)	1/4 波長 周 期 (μs)	1/4 波長 振 動 数 (KC)
P	U	1550	23.5	42.6	1500	21.0	47.7	1500	25.5	39.2
	V	1370	20.0	50.0	1400	/		"	"	"
	W	1650	24.5	41.8	1560			"	"	"
Q	U	1550	23.5	42.6	1500	21.0	47.7	"	"	"
	V	1370	20.5	48.8	1400	/		"	"	"
	W	1650	24.5	41.8	1560	21.0	47.7	"	"	"
R		520	17.0	58.8	500	17.0	58.8	500	19.0	52.7
S	U	1550	24.5	41.8	1490	22.0	45.5	1500	26.0	38.5
	V	1370	23.0	43.5	1400	22.0	45.5	"	"	"
	W	1650	27.0	37.0	1540	22.0	45.5	"	"	"
T	U	1550	23.5	42.6	1490	21.5	46.6	"	25.5	39.2
	V	1370	20.5	48.8	1400	21.0	47.7	"	"	"
	W	1650	24.5	41.8	1540	21.0	47.7	"	"	"

ダンスの初期値である。また各相の巻線の減衰係数および伝播速度を求め、表

にして示したのが第2・2表である。

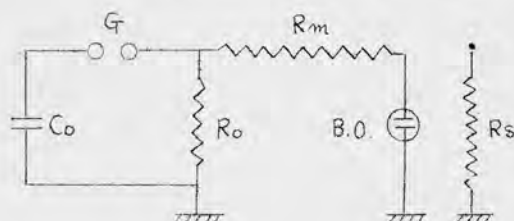
第2・2表

試験 ケース	供 試 相	回転子がある場合		模擬制動巻線を有する場合		回転子がない場合	
		減衰率	巻線と巻線抵抗に等 する時間 (μs)	減衰率	巻線と巻線抵抗に等 する時間 (μs)	減衰率	巻線と巻線抵抗に等 する時間 (μs)
P	U	0.54	10	0.38	9.5	0.31	10
	V	0.32	9.5	0.36		0.31	10
	W	0.65	11.5	0.36	9.5	0.31	10
Q	U	0.60		0.37		0.31	
	V	0.40		0.33		0.31	
	W	0.68		0.35		0.31	
R		0.63		0.57		0.46	
S	U	0.67		0.44			
	V	0.48		0.42			
	W	0.77		0.39			
T	U	0.50		0.31			
	V	0.40		0.33			
	W	0.62		0.36			

82・2 6,600V, 1,500 KVA 発電機の過渡波動インピーダンス

測定回路は第2・7図に示す通りである。各相巻線の過渡波動インピーダンス

第2・7図 測定回路



$C_o : 2 \mu F$
 $R_o : 1000 \Omega$
 $R_m : 35 K\Omega$
 $R_s : 1000 \Omega$

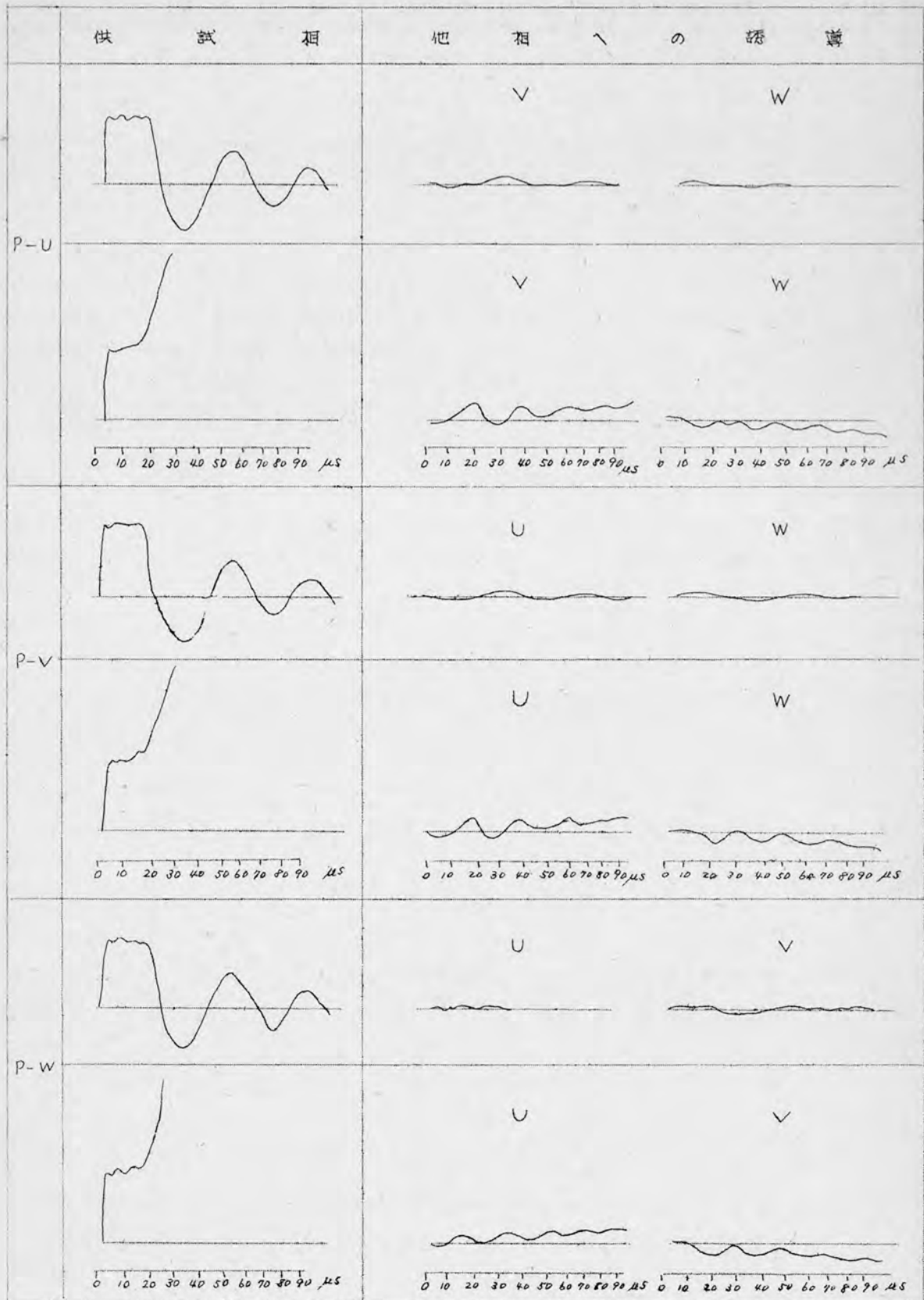
ス、オツシログラムは第2・8図および第2・9図に示す。第2・8図は回転子がある場合、第2・9図は回転子を取り除いた場合のオツシログラムである。これらオツシログラムから、波動インピーダンスおよび $1/4$ 波長振動数を求めて表にしたのが第2・3表である。

第 2・3 表

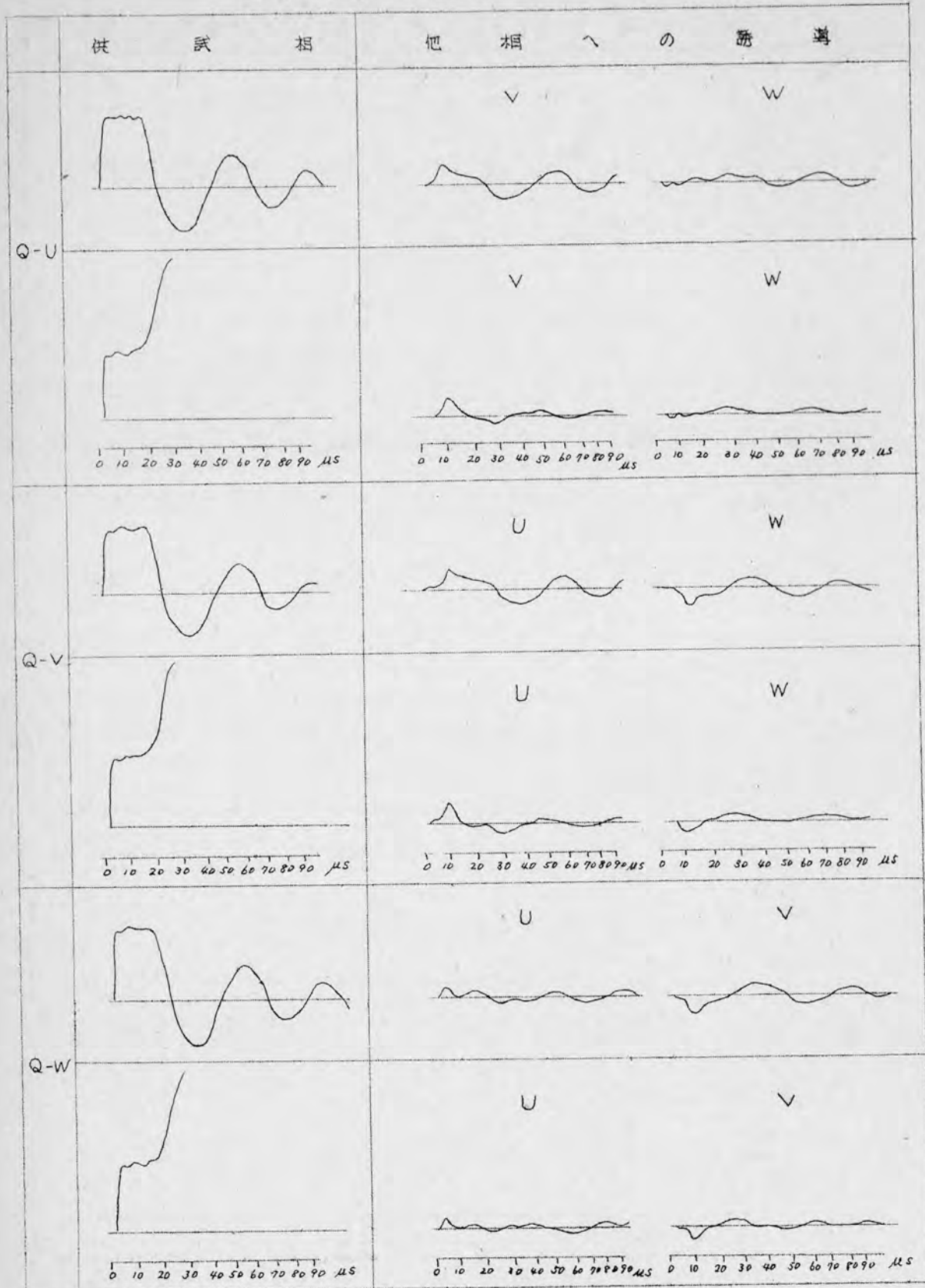
試験 ケース	供 損	回 転 子 が な い 場 合			回 転 子 が 有 る 場 合		
		波 動 インピーダンス (Ω)	1/4 波 長 周 期 (μs)	1/4 波 長 振 動 数 (KC)	波 動 インピーダンス (Ω)	1/4 波 長 周 期 (μs)	1/4 波 長 振 動 数 (KC)
P	U	880	38.5	26.0	880	40.0	25.0
	V	880	44.5	22.5	"	40.0	"
	W	880	44.5	22.5	"	40.0	"
Q	U	880	39.0	25.6	"	43.0	23.3
	V	880	44.5	22.5	"	43.0	"
	W	880	44.5	22.5	"	43.0	"
R		290	35.0	28.6	290	33.0	30.3
S	U				880	44.0	22.8
	V				"	46.0	21.8
	W				"	44.0	22.8
T	U				"	40.0	25.0
	V				"	40.0	25.0
	W				"	41.0	24.4

第2・8図(その1)

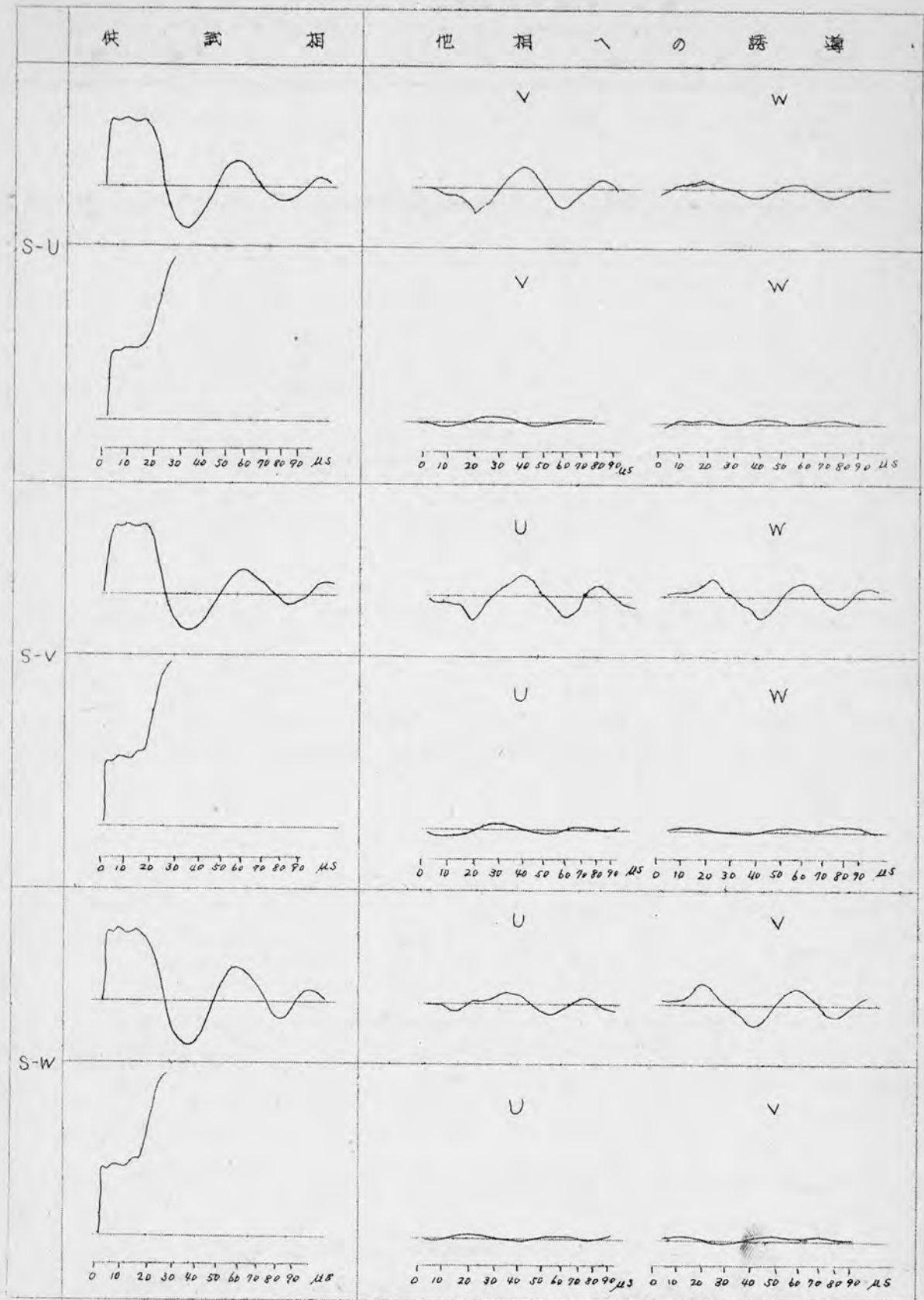
6600V, 1500KVA 回転子有



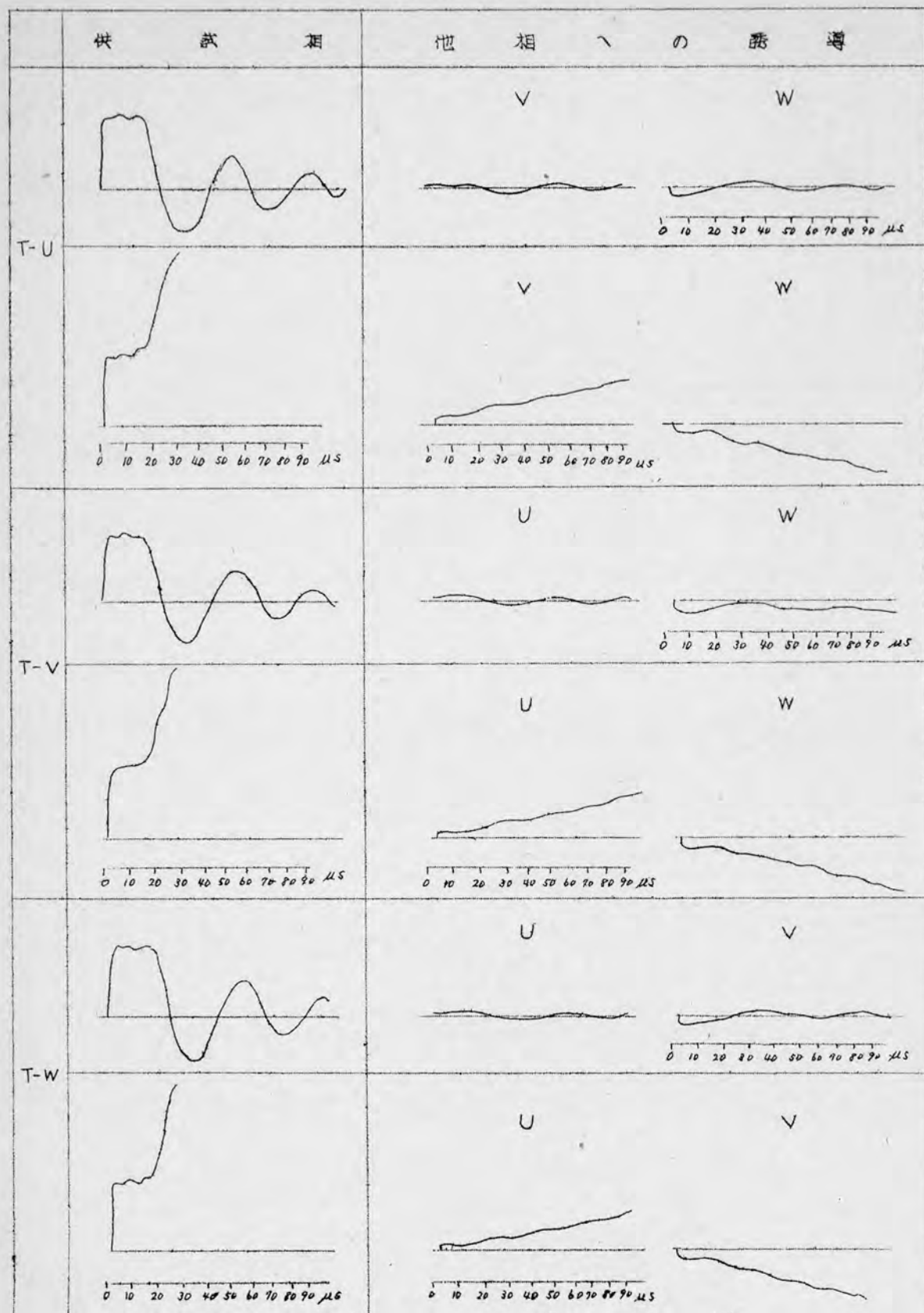
第 2・8 図 (その 2)



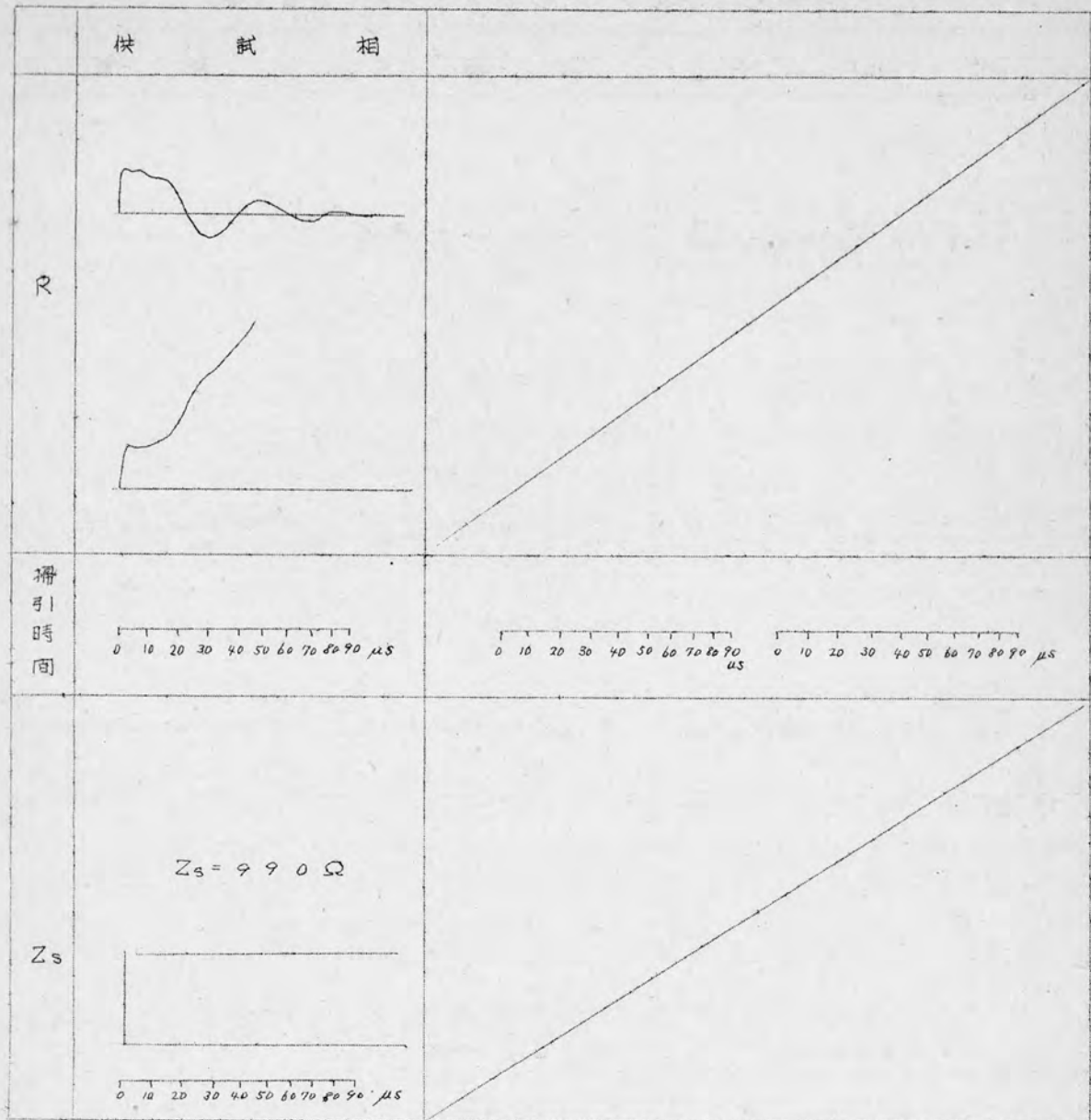
第 2 ・ 8 図 (そ の 3)



第 2・8 図 (その 4)

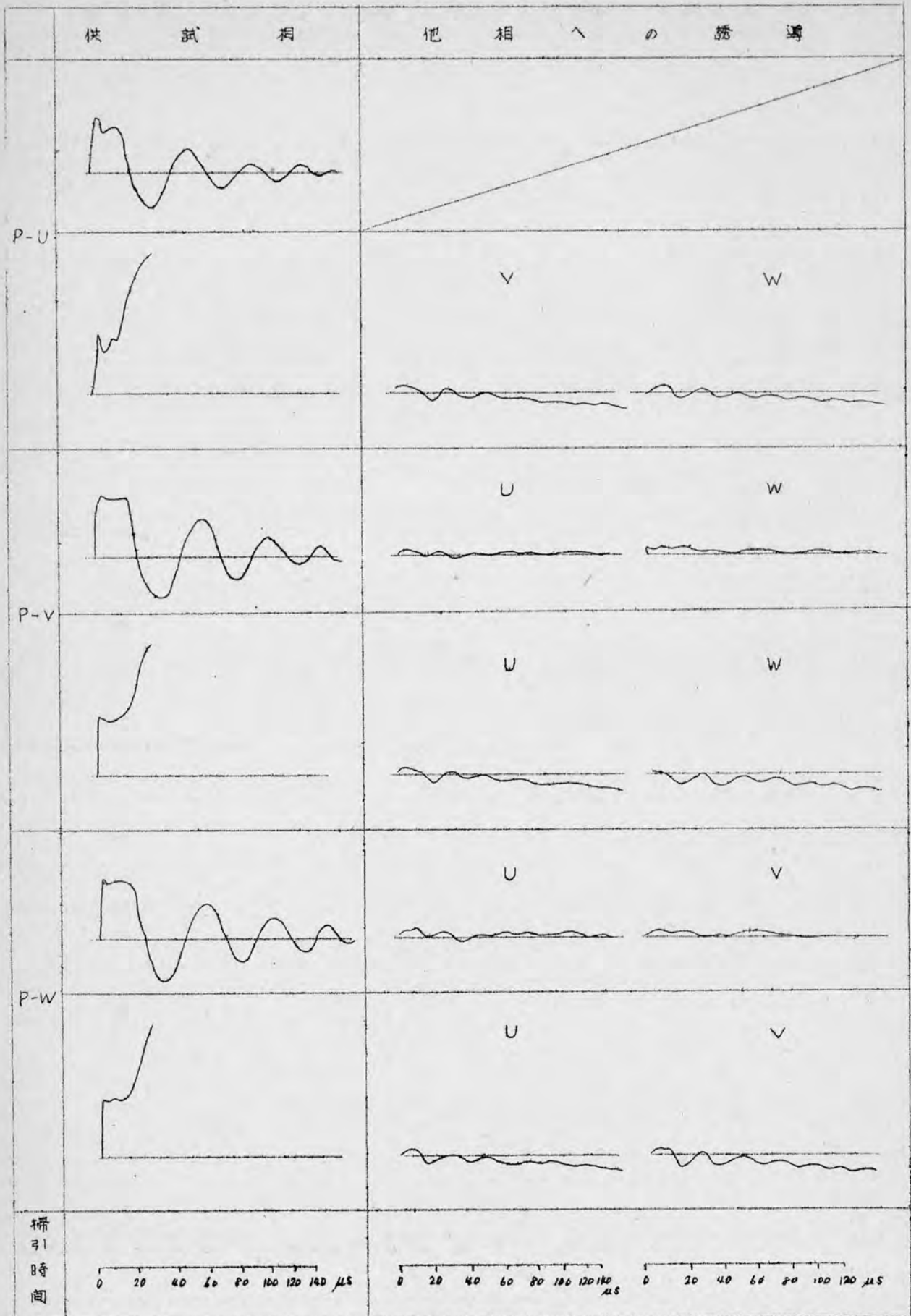


第 2 ・ 8 図 (せ の 5)

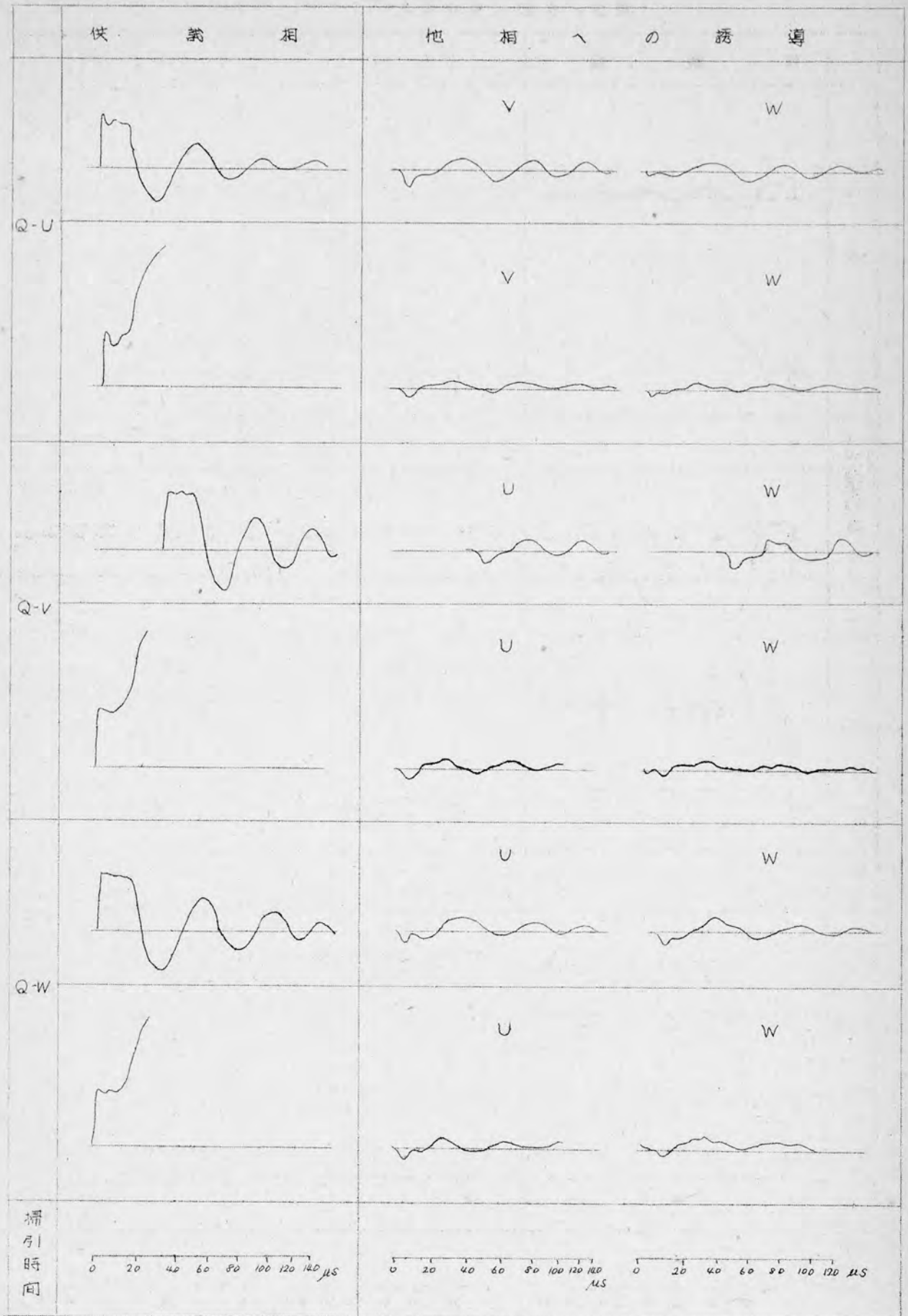


第2・9図(その1)

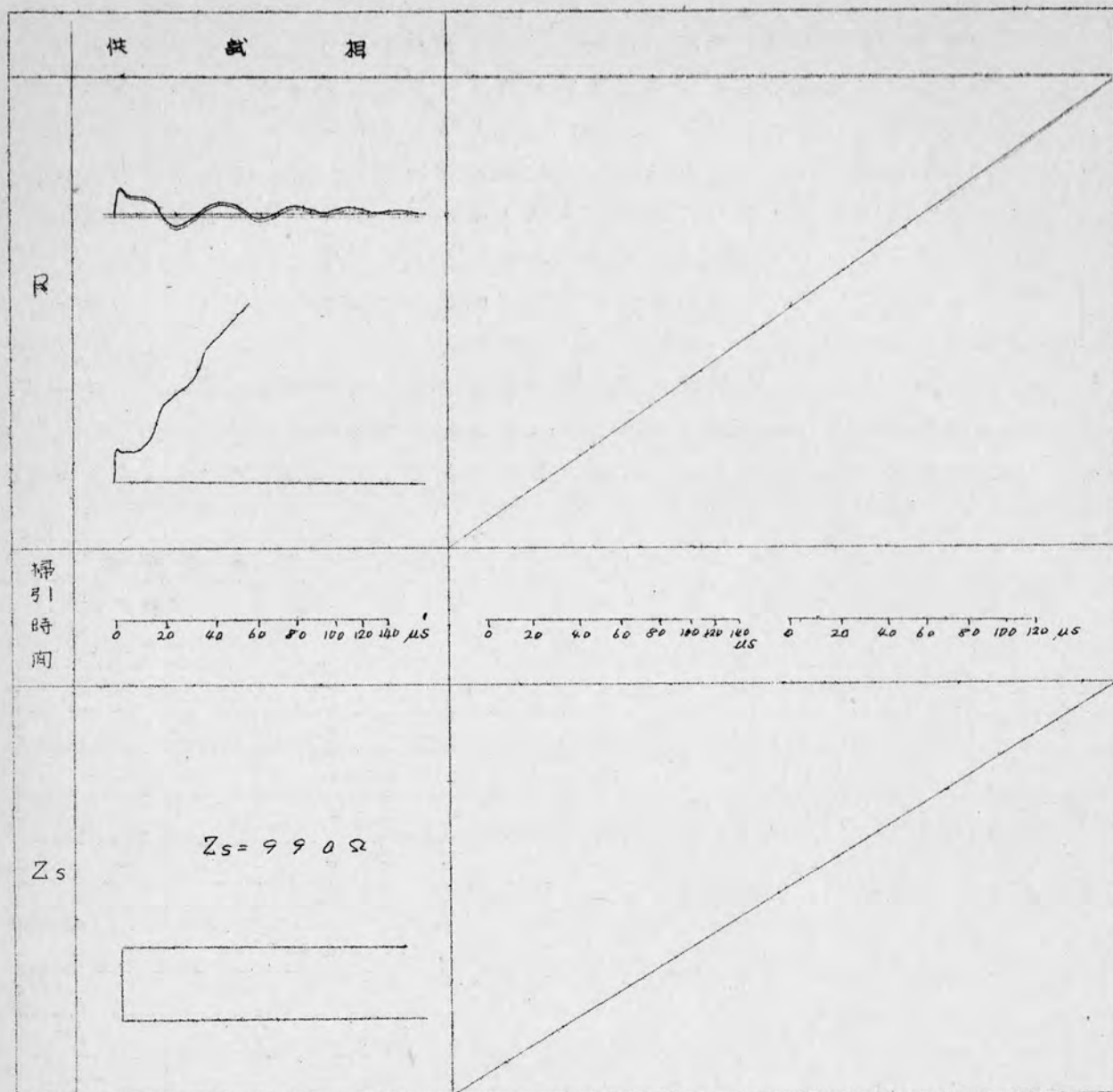
6600V, 1500KVA 回転子無



第 2・9 図 (その 2)



第 2 ・ 9 図 (そ の 3)



なお、第2・8図、第2・9図のオシログラムと第2・3表から次の事が云える。

- 1 回転子を除いた場合固定子巻線のV相とW相とのオシログラムは大体同一であるが、U相は他の二相の波形と異なったものである。これは線輪の巻回間が短絡したものと考えられる。(本文第6章参照)
- 2 回転子が挿入されている場合は各相の過渡波動インピーダンス波形は同一である。この場合の回転子磁極と固定子線輪との関係位置は記録されていないが、初期において回転子の磁極の影響が認められない。
- 3 したがって、回転子がある場合とない場合との波動インピーダンスは同一である。
- 4 この理由としては、固定子溝が半周溝であるので、初期において、溝外に出る磁束が少いためと考えられる。(本文第3章参照)

当該発電機巻線の減衰および伝播速度を求めて示したのが第2・4表である。

第2・4表

試験 ケース	供 試 相	回 転 子 が な い 場 合		回 転 子 が あ る 場 合	
		減 衰 係 数	伝 播 速 度 ($m/\mu s$)	減 衰 係 数	伝 播 速 度 ($m/\mu s$)
P	U	0.30	87.5	0.30	82.5
	V	0.21	82.5	0.30	"
	W	0.20	"	0.30	"
Q	U	0.40	87.5	0.30	"
	V	0.20	82.5	0.30	"
	W	0.20	"	0.30	"
R		0.44	"	0.50	"
S	U	/	/	0.42	/
	V			0.42	
	W			0.42	
T	U	/	/	0.30	/
	V			0.30	
	W			0.30	

§2・3 3450V, 720KVA発電機の過渡波動インピーダンス

当該発電機の過渡波動インピーダンスは回転子が挿入された状態においてのみ測定し、P、QおよびRケースについて実測した。測定したオシログラムは第2・10図の通りである。

測定回路の定数は $C_0 = 6 \mu F$, $R_0 = 1 k\Omega$, $R_m = 30 k\Omega$, $R_s = 495 \Omega$ であつて、 $R_m/R_s \approx 60$ であるので、短時間域においては(1・7)式が成立する。

第2・10図より当該発電機の波動インピーダンスおよび $1/4$ 波長の周期と

固有振動数を表にすると第2・5表の通りである。なお巻線の減衰係数および伝播速度を示したのが第2・6表である。

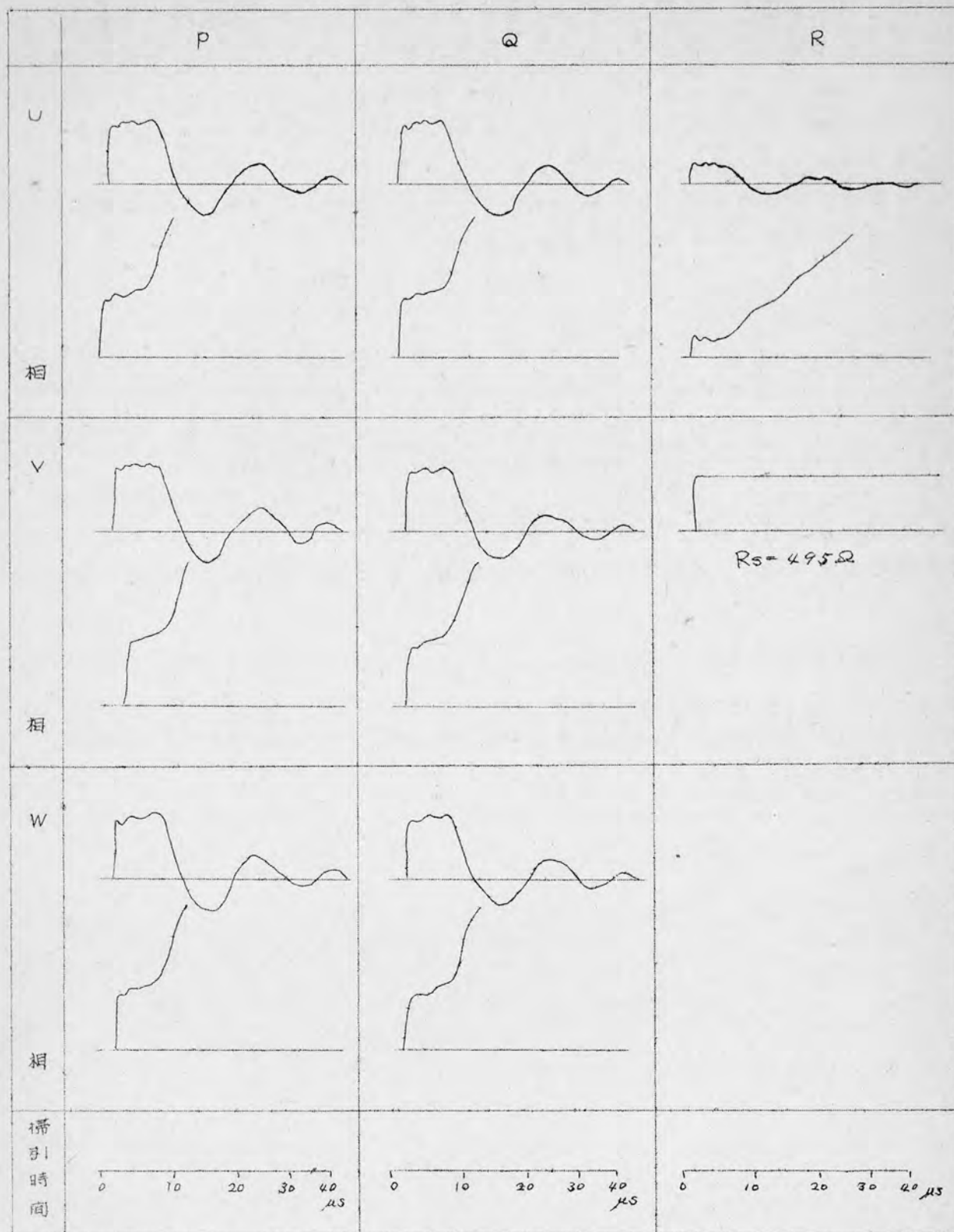
第2・5表

試験ケース	供試相	回 転 子 が 有 る 場 合		
		波インピーダンス (Ω)	$\frac{1}{4}$ 波長 周 (μs)	$\frac{1}{4}$ 波長 振動 (KC)
P	U	540	9	110
	V	540	9	110
	W	540	9	110
Q	U	540	9	110
	V	540	9	110
	W	540	9	110
R		180	7.3	137

第2・6表

試験ケース	供試相	減 衰 係 数	巻線を往復するに 要する時間 μs
P	U	0.5	20.5
	V	0.5	"
	W	0.5	"
Q	U	0.55	"
	V	0.55	"
	W	0.55	"
R		0.53	"

第 2 · 10 圖

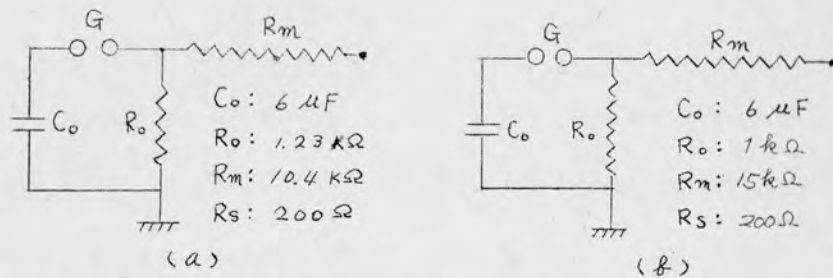


§2・4 11000V, 11000KVA 発電機の過渡波動インピーダンス

供試発電機は2台で、発電機の定格は同一であり、製作所も同一である。しかし製作年月日が異なっている。1台は昭和18年製のもので、制動巻線を有していない。他の1台は昭和29年製で制動巻線を有している。前者の発電機では回転子がある場合とない場合、後者は回転子（制動巻線付）がある場合の過渡波動インピーダンスを実測した。

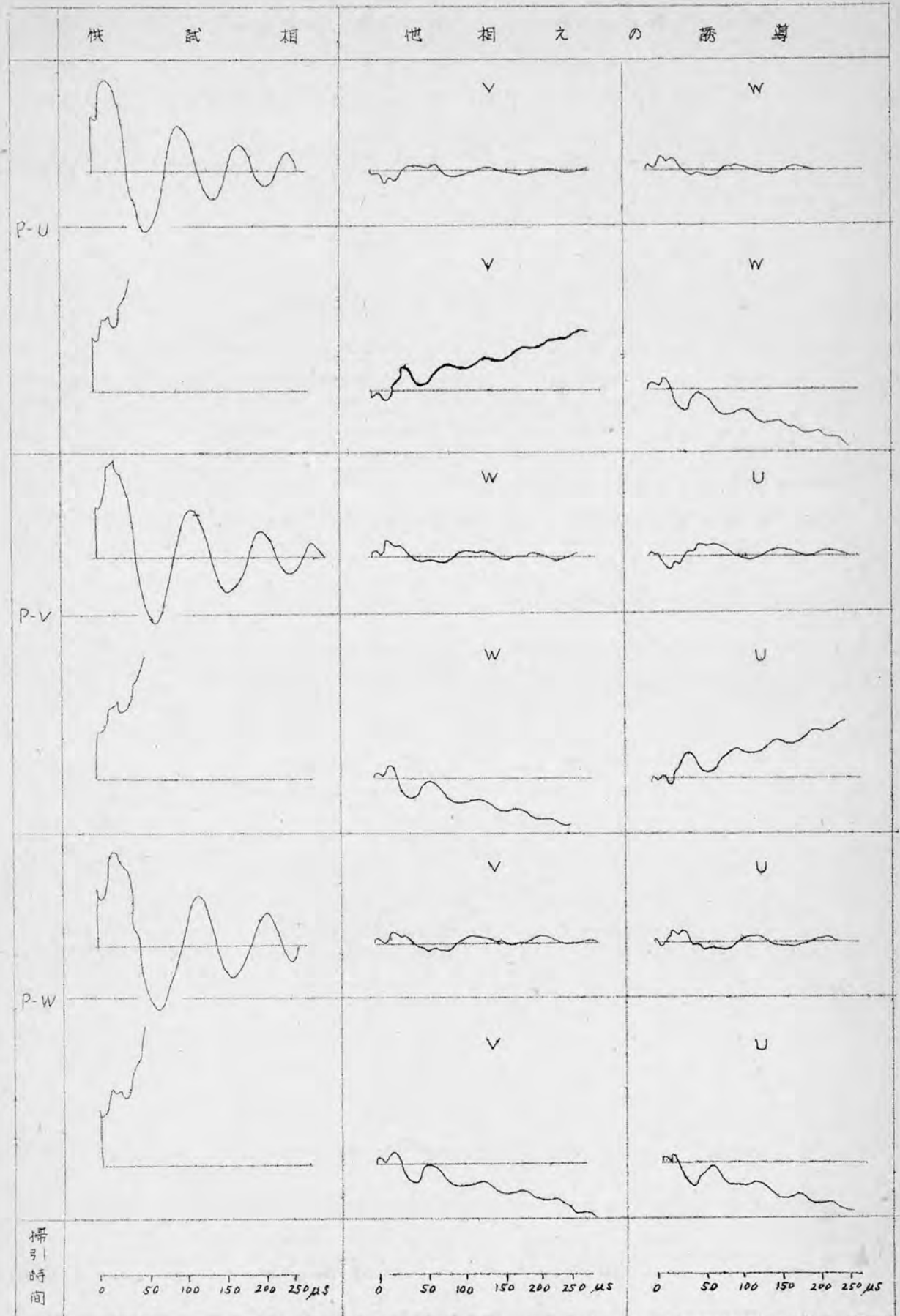
測定回路は第2・11図に示す通りで、(a)は昭和18年製、(b)は昭和29年製の発電機に対するものである。

第2・11図 測定回路

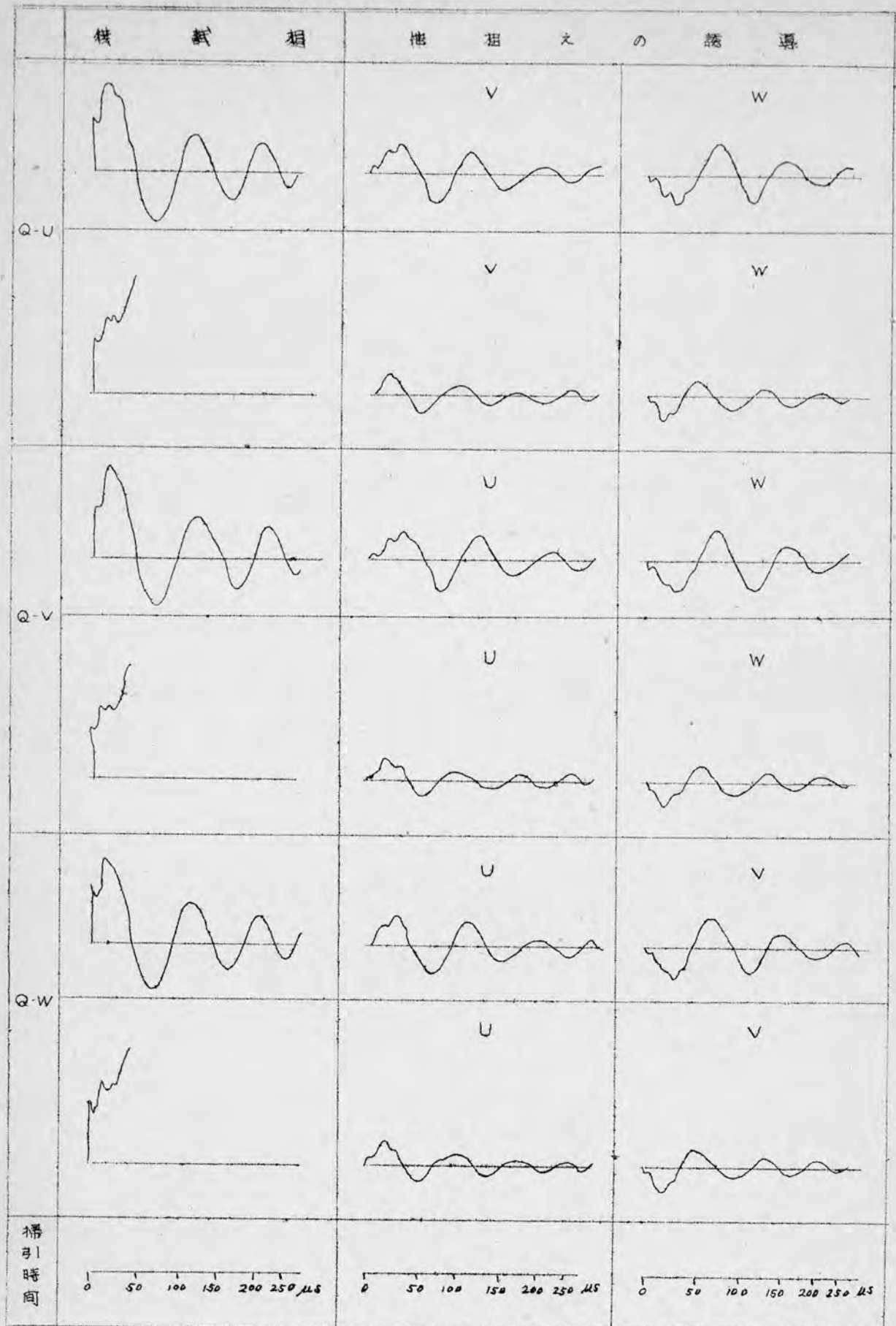


回転子がない場合の過渡波動インピーダンスのオシロスコープ図は第2・12図、回転子がある場合は第2・13図、制動巻線がある場合は第2・14図に示した。

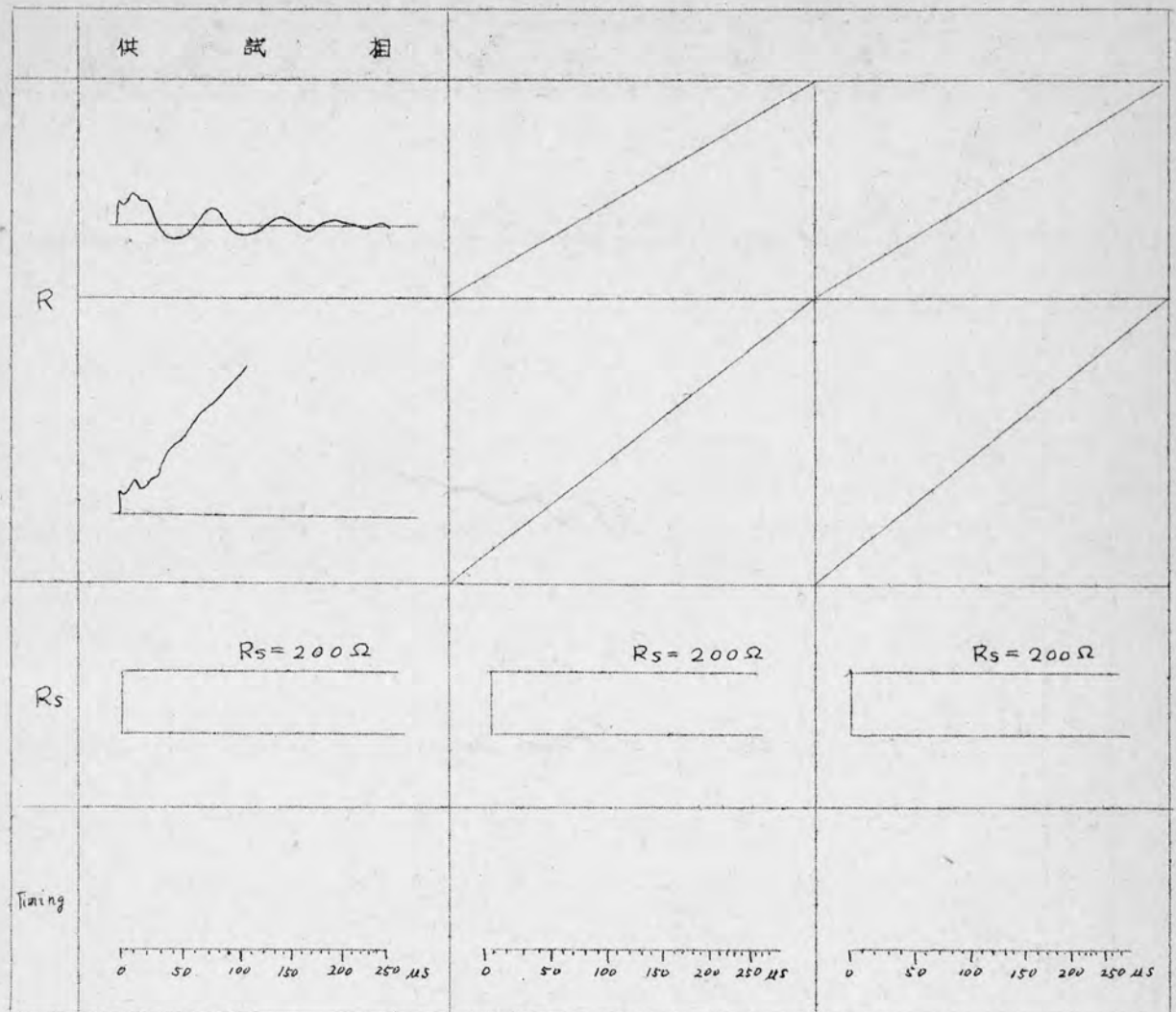
第 2 · 12 図 (その 1) 回転子がない場合の固定子巻線の
~~インピーダンス~~ インピーダンス
 シロケラムと地相の誘導波形



第2・12図 (その2)

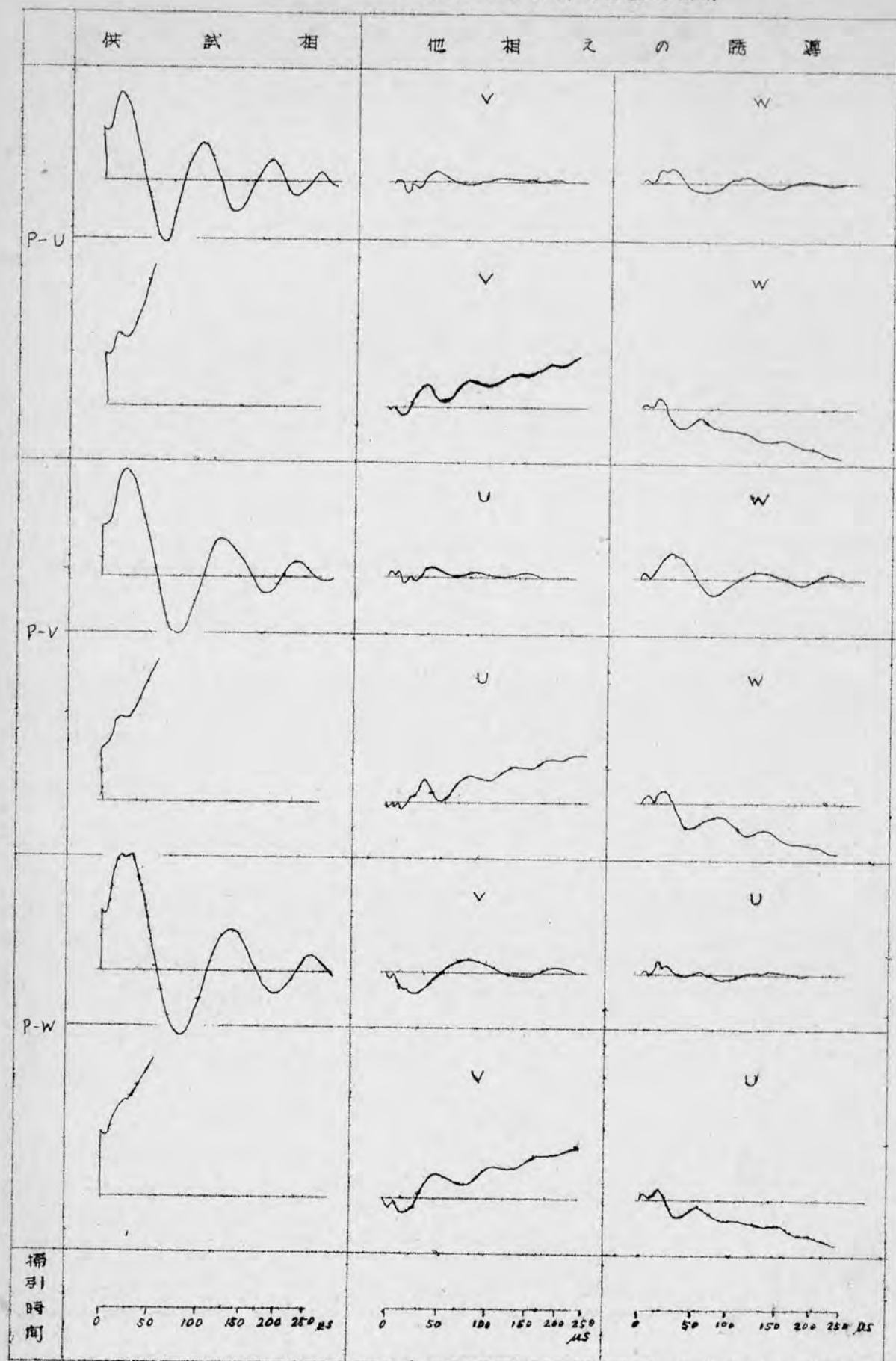


第 2 ・ 12 図 (そ の 3)

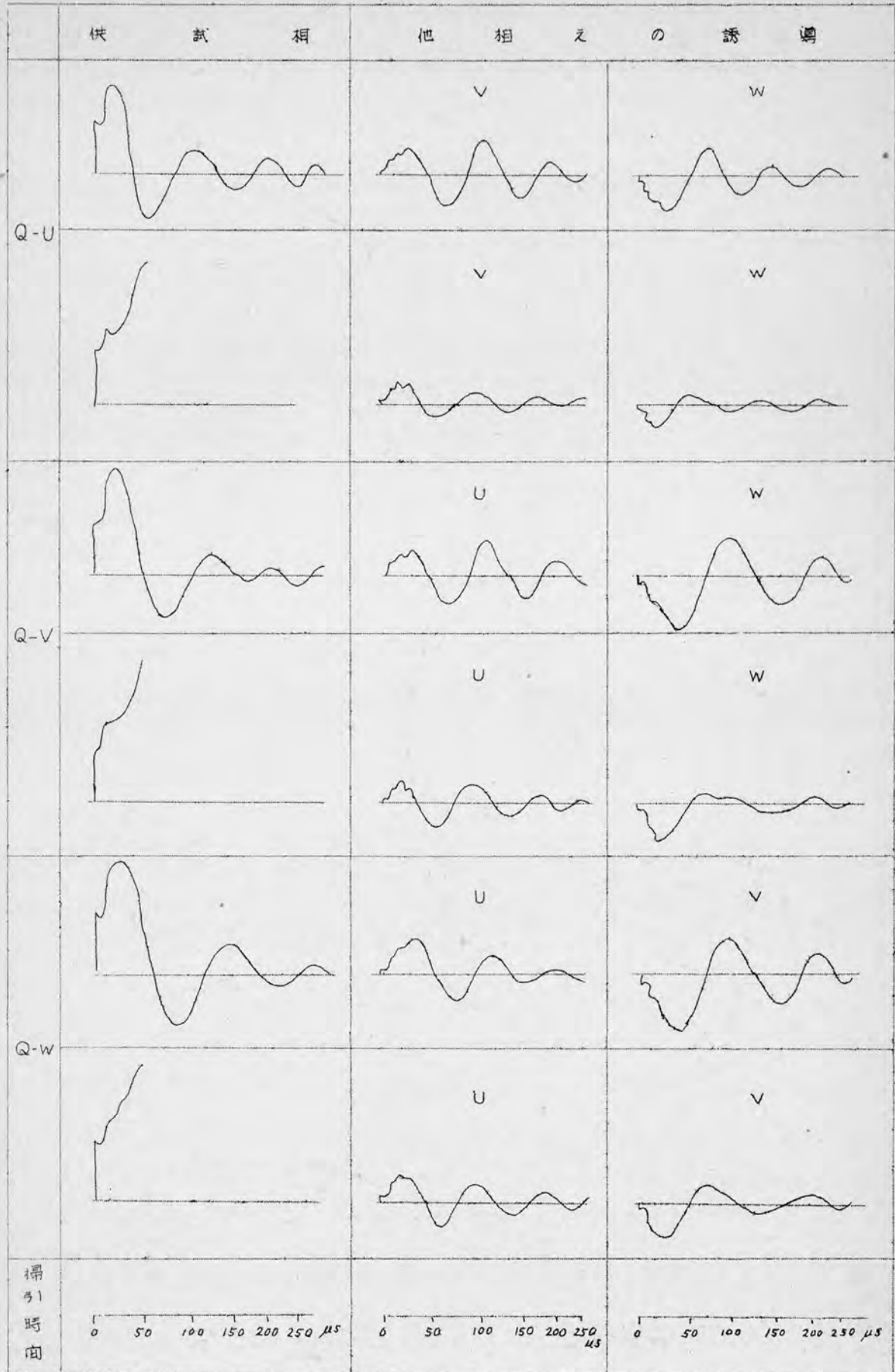


〔註〕 右側のオシロタラムは反対になっている。

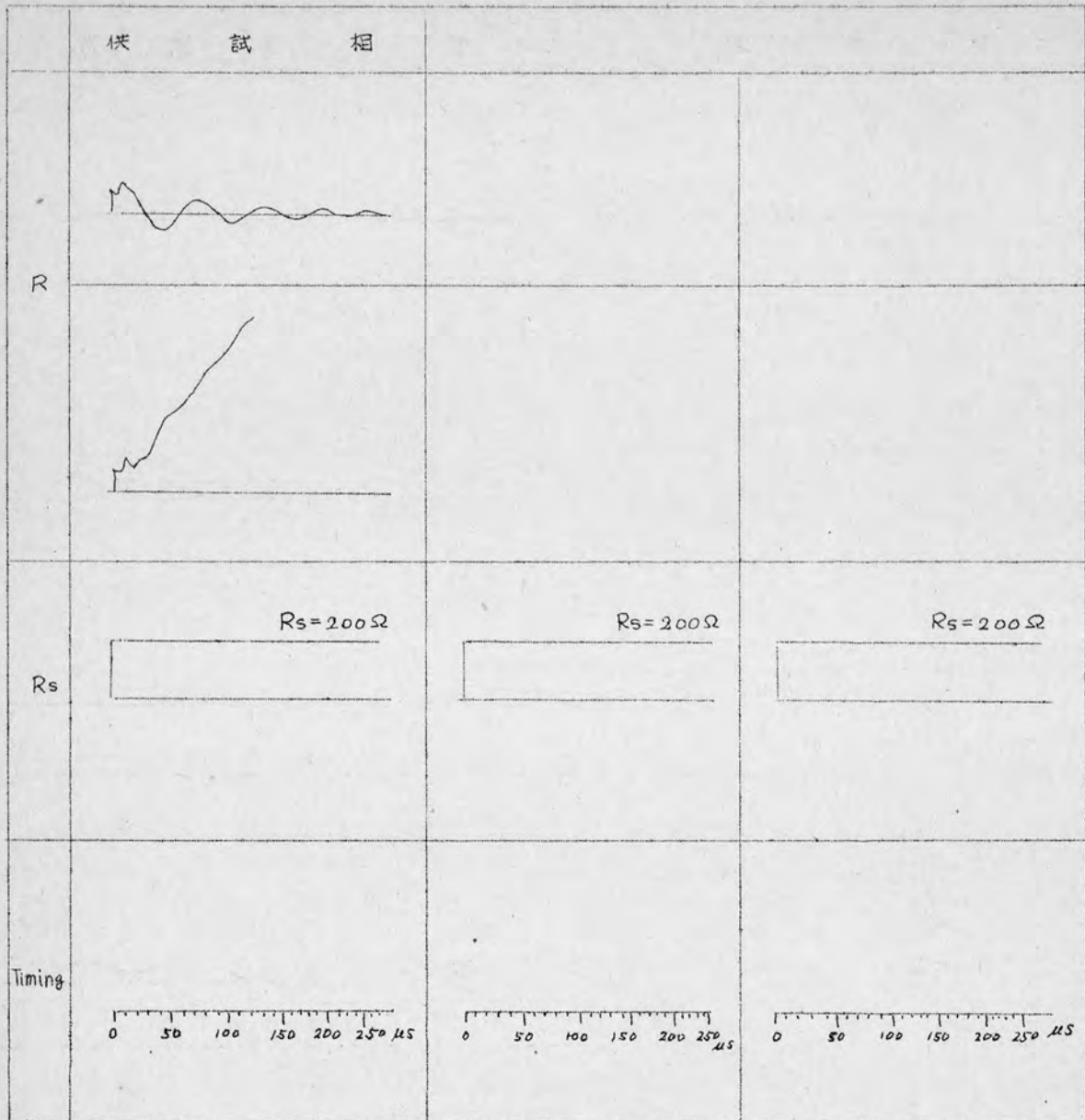
第2・13図 (その1) 回転子巻線がある場合の固定子巻線の
~~インピーダンス~~ インピーダンスオシロ
 スコップと他相への誘導波形



第 2・13 図 (その 2)

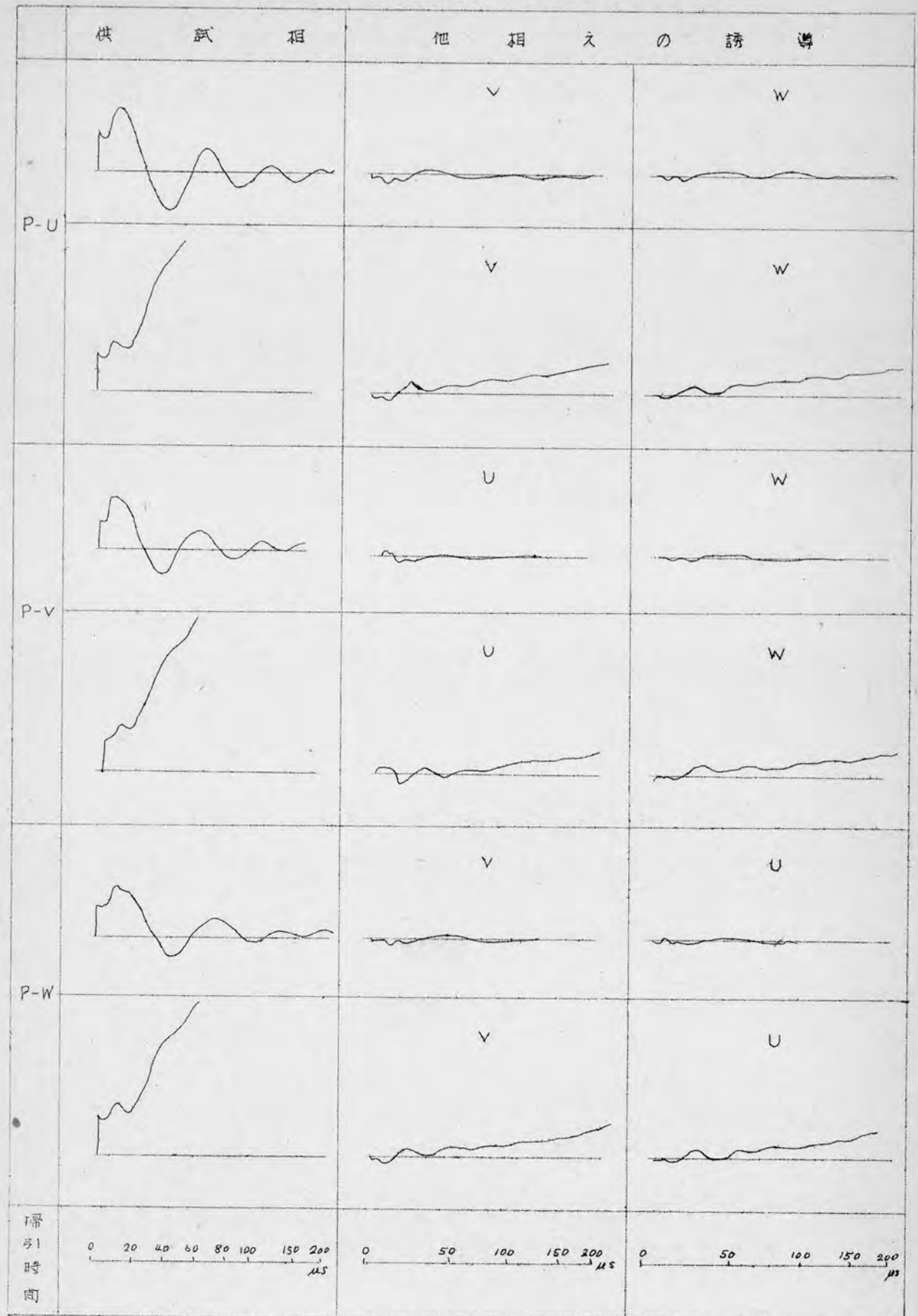


第 2 · 13 図 (セ の 3)

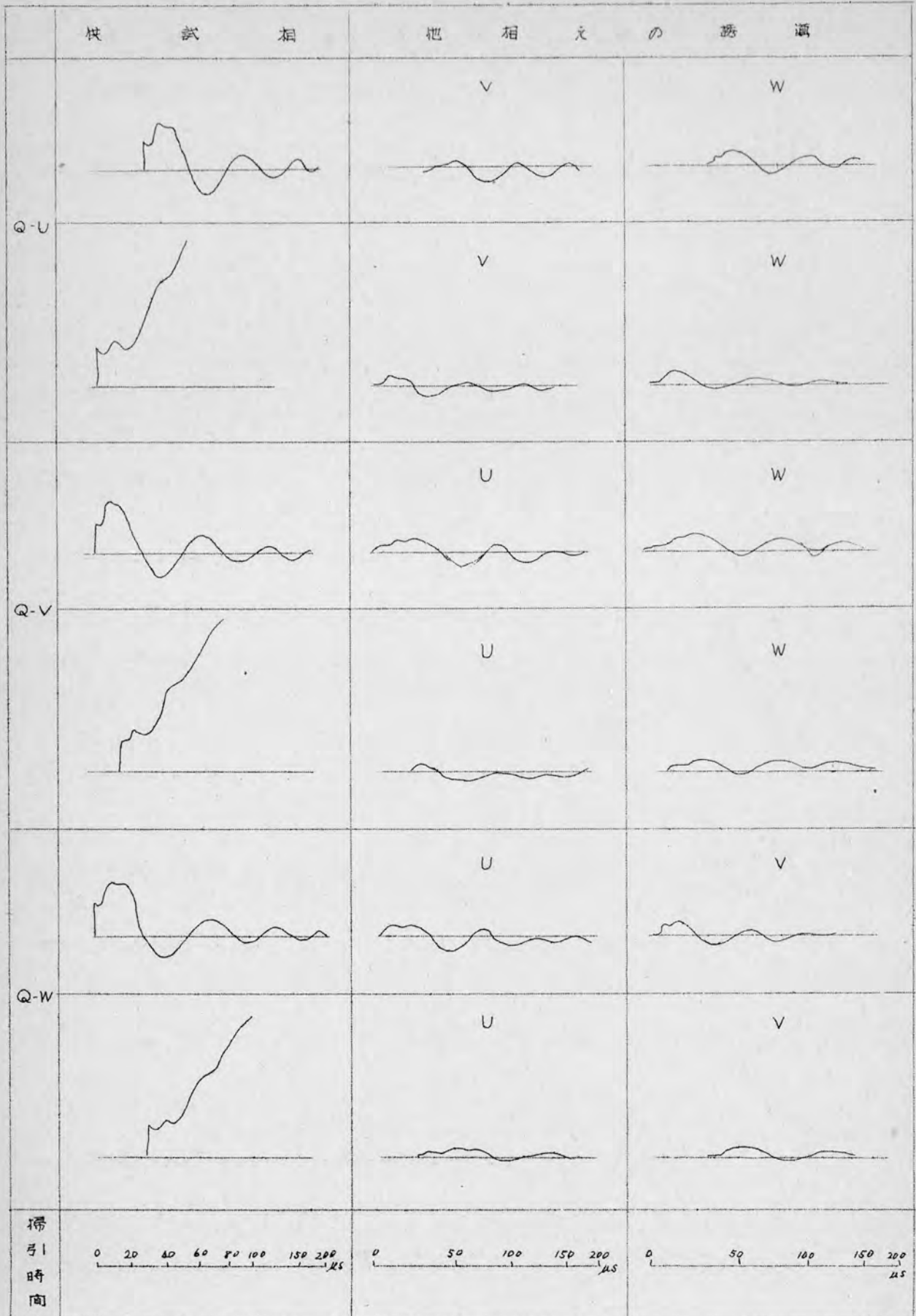


第 2 ・ 14 図 (その 1)

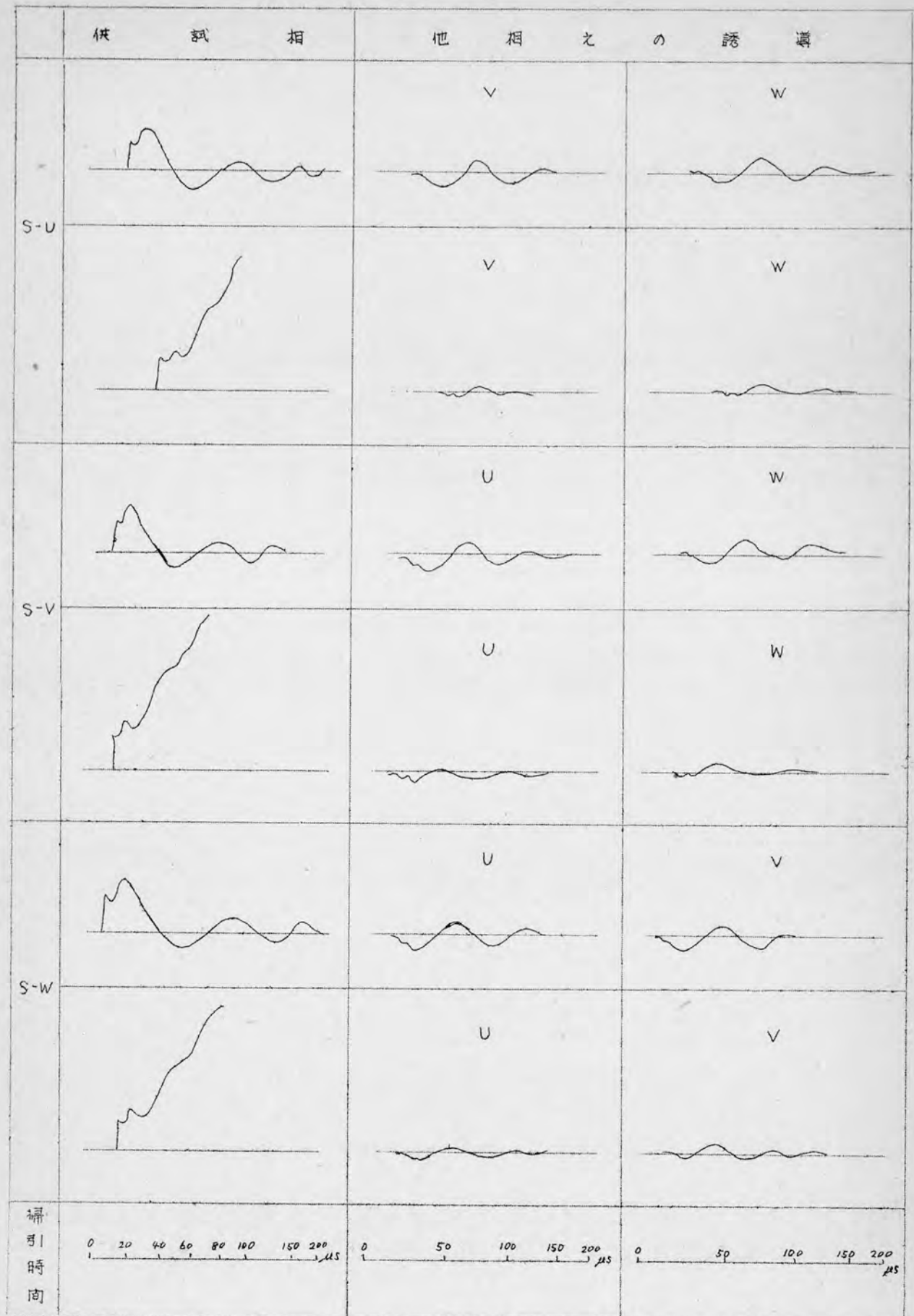
11.000V, 11.000KVA 削動巻線を有する場合の過渡波動インピーダンス



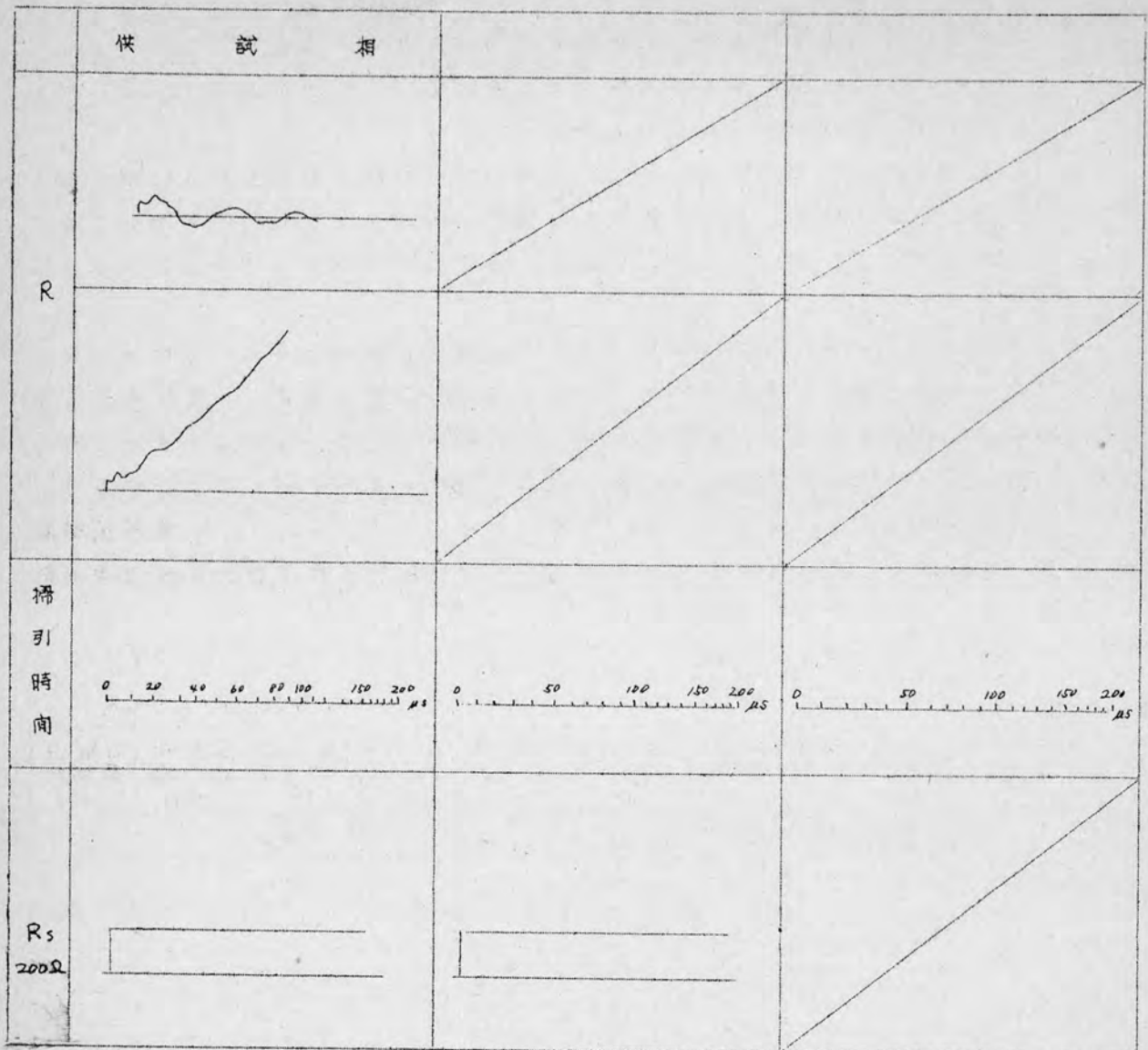
第 2 ・ 14 図 (その 2)



第 2 ・ 14 図 (そ の 3)



第 2 ・ 14 図 (での 々)



第2・12図、第2・13図および第2・14図のオシログラムを比較すると、下記の通りである。

- (1) 回転子がない場合の固定子の各相巻線の初期における過渡インピーダンスオシログラムは回転子がある場合の過渡波動インピーダンスオシログラムに比して凹凸の著しい曲線である。
 - (2) U相およびW相の過渡波動インピーダンス波形には回転子がない場合および回転子がある場合（制動巻線がある場合をも含む）にも初期の部分に著しい突起を有する。V相では殆んど認められない程度のものである。（本文第2章参照）
 - (3) 波動インピーダンスを波頭より5〜7μs附近の点にとると、回転子がない場合は大体各相とも等しくPケースでは230Ω位であるが、回転子がある場合はW相が大で約250Ω、次はV相で約220Ω、U相は約230Ωで一斉小さい。制動巻線がある場合は大体各相とも等しく約180Ωである。
- 供試発電機の波動インピーダンス（5〜7μsにおいて）と1/4波長振動数を表にして示したのが第2・7表である。また巻線の減衰係数および伝播速度を表にして示したのが第2・8表である。

第2・7表

試験ケース	供試相	回転子がある場合			回転子がない場合			制動巻線がある場合		
		波動インピーダンス(Ω)	1/4波長周期(μs)	1/4波長振動数(KC)	波動インピーダンス(Ω)	1/4波長周期(μs)	1/4波長振動数(KC)	波動インピーダンス(Ω)	1/4波長周期(μs)	1/4波長振動数(KC)
P	U	230	85	11.8	230	85 20	14.3	180	112	8.9
	V	220	85 80	9.6	230	85 80	11.2	180	112	8.9
	W	250	85 100	9.1	230	85 100	9.4	180	112	8.9
Q	U	230	95	10.5	220	95	10.5	180	115	8.7
	V	220	105 115	8.7	220	105	9.5	180	115	8.7
	W	250	105 125	7.6	220	130	7.7	180	115	8.7
R		70	65 5	15.4	70	65 5	15.4	55	80	12.5

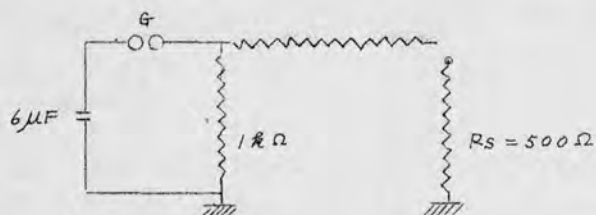
第2・8表

試験 ケース	供 試 相	回転子がない場合		回転子がある場合		制動巻線を有する場合	
		減衰係数	伝播速度 (m/μs)	減衰係数	伝播速度 (m/μs)	減衰係数	伝播速度 (m/μs)
P	U	0.32	53.5	0.41	58.	0.36	43.
	V	0.29	47	0.43	43.5	0.50	43.
	W	0.29	47	0.44	41.	0.55	43.
Q	U	0.37		0.45		0.44	43.
	V	0.39		0.52		0.42	43.
	W	0.42		0.54		0.57	43.
R		0.50		0.45		0.50	
S	U					0.51	
	V					0.62	
	W					0.67	

§ 2.5 3450V, 2800KVA発電機過渡波動インピーダンス

当該発電機は制動巻線を有している。測定は回転子がある場合についてのみ行った。測定回路は第 2.15 図に示す通りである。測定した当該発電機のインピーダンス

第 2.15 図 測定回路



$C_0 : 6 \mu F$
 $R_0 : 1 k \Omega$
 $R_m : 20 k \Omega$
 $R_s : 500 \Omega$

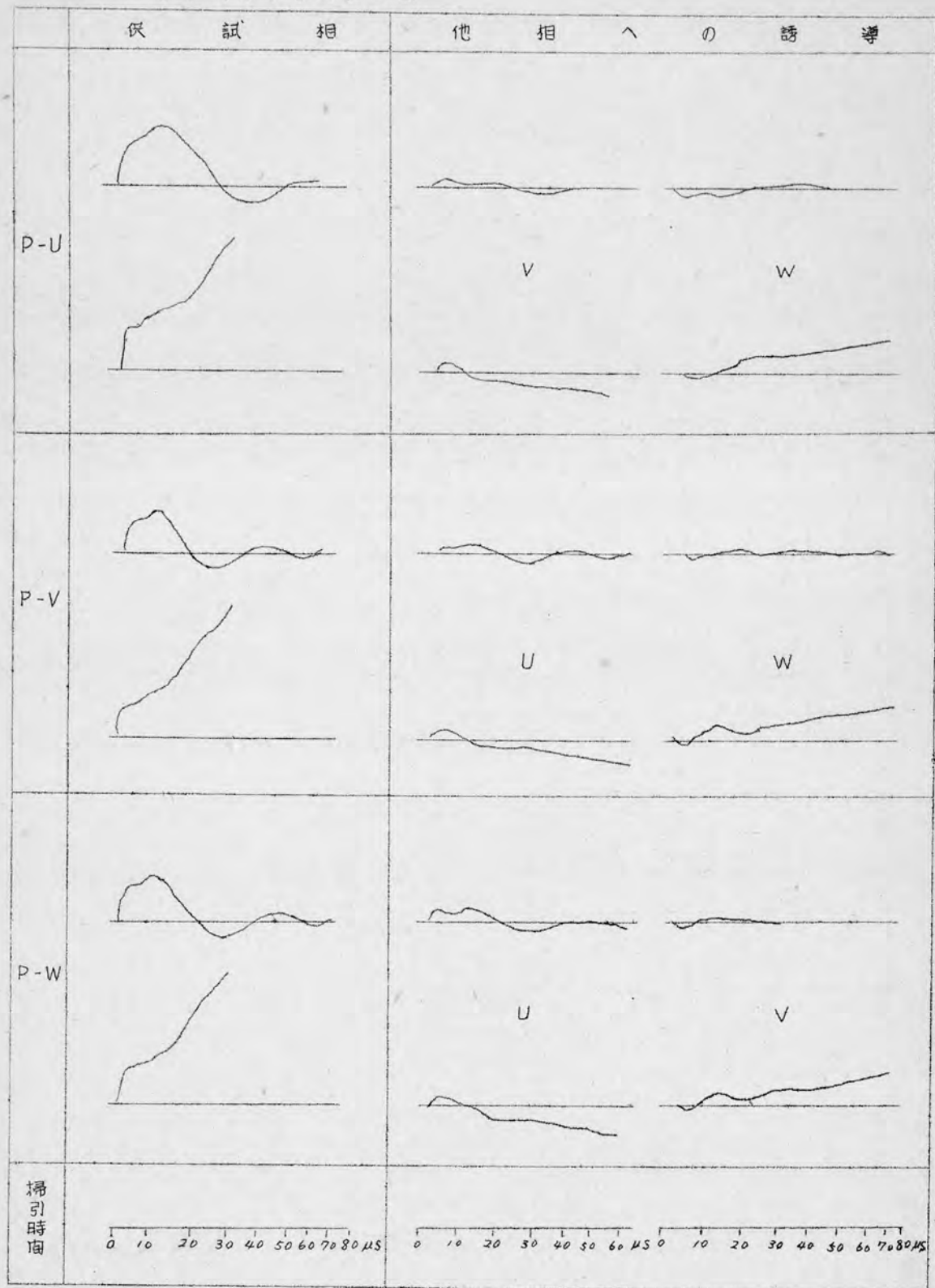
インピーダンスは第 2.16 図に示した。

第 2.9 表

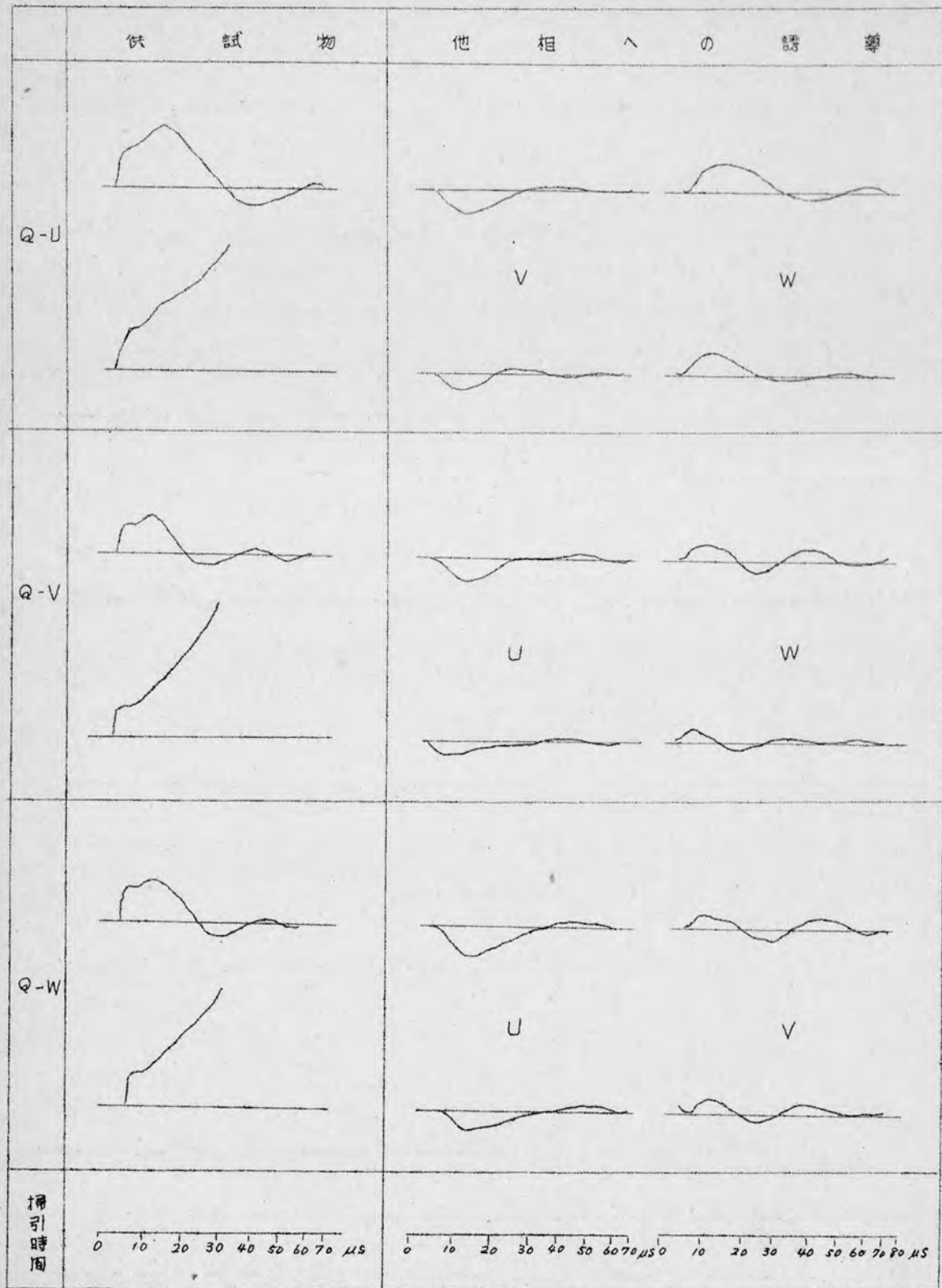
試験 ケース	供試 相	波動インピ ーダンス(e)	1/4 波長周 期 (μs)	1/4 波長振 動数 (KC)
P	U	450	50	20.0
	V	350	35	28.6
	W	400	40	25.0
Q	U	460	55	18.2
	V	350	35	28.6
	W	400	45	22.2
R		70	15	66.8
S	U	460	55	18.2
	V	350	35	28.6
	W	400	35	28.6
T	U	400	35	28.6
	V	310	25	40.0
	W	350	25	40.0

第 2.16 図の名試験
ケースのオシロスラム
から、各相の波動インピ
ーダンスと半波長の振動
数を求めたのが、第 2.
9 表である。

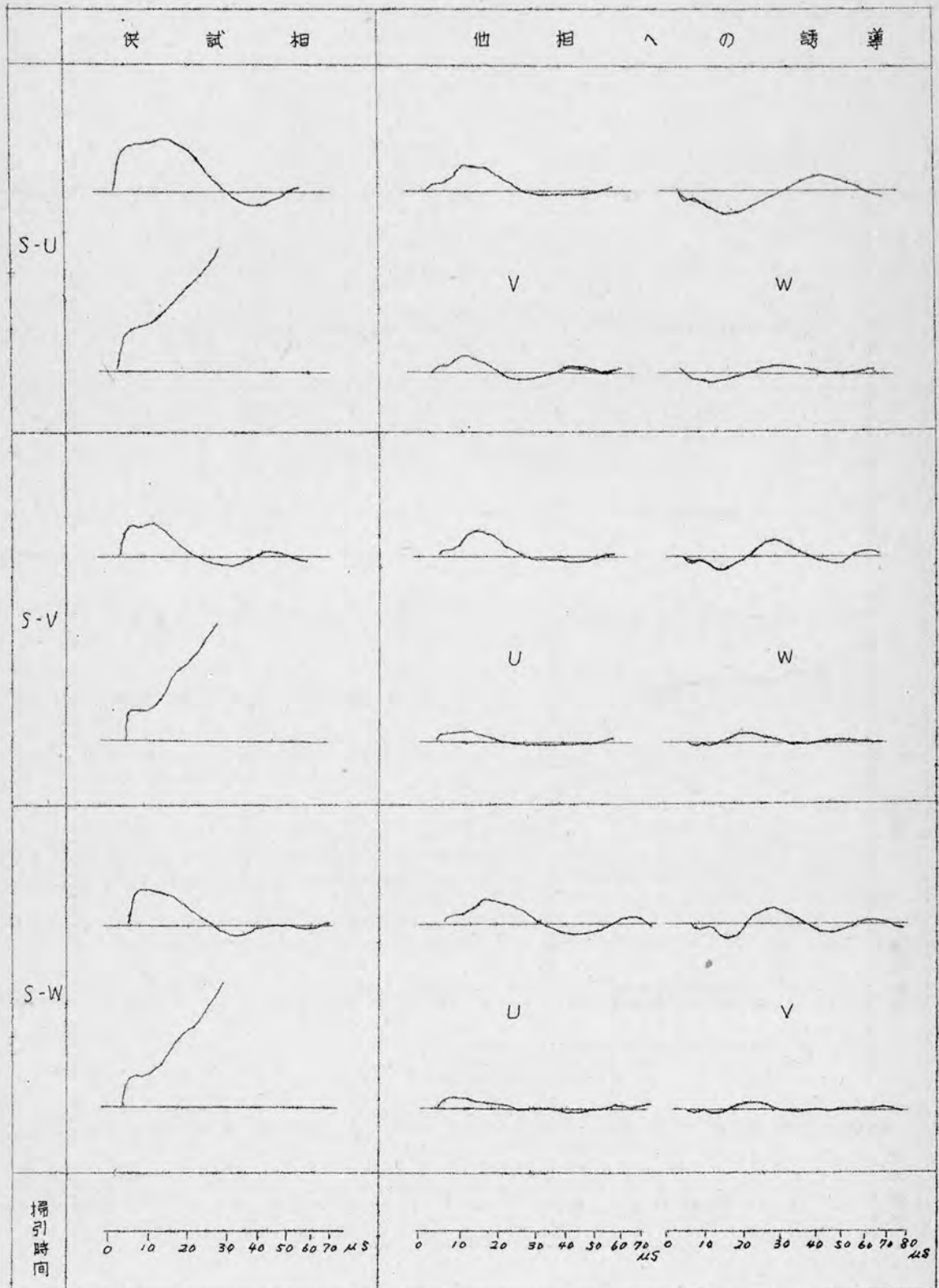
第2.16図(その1) (P-Case)
 3450V, 2800KVA のインディシヤル・インピー
 ダンスオツシログラム



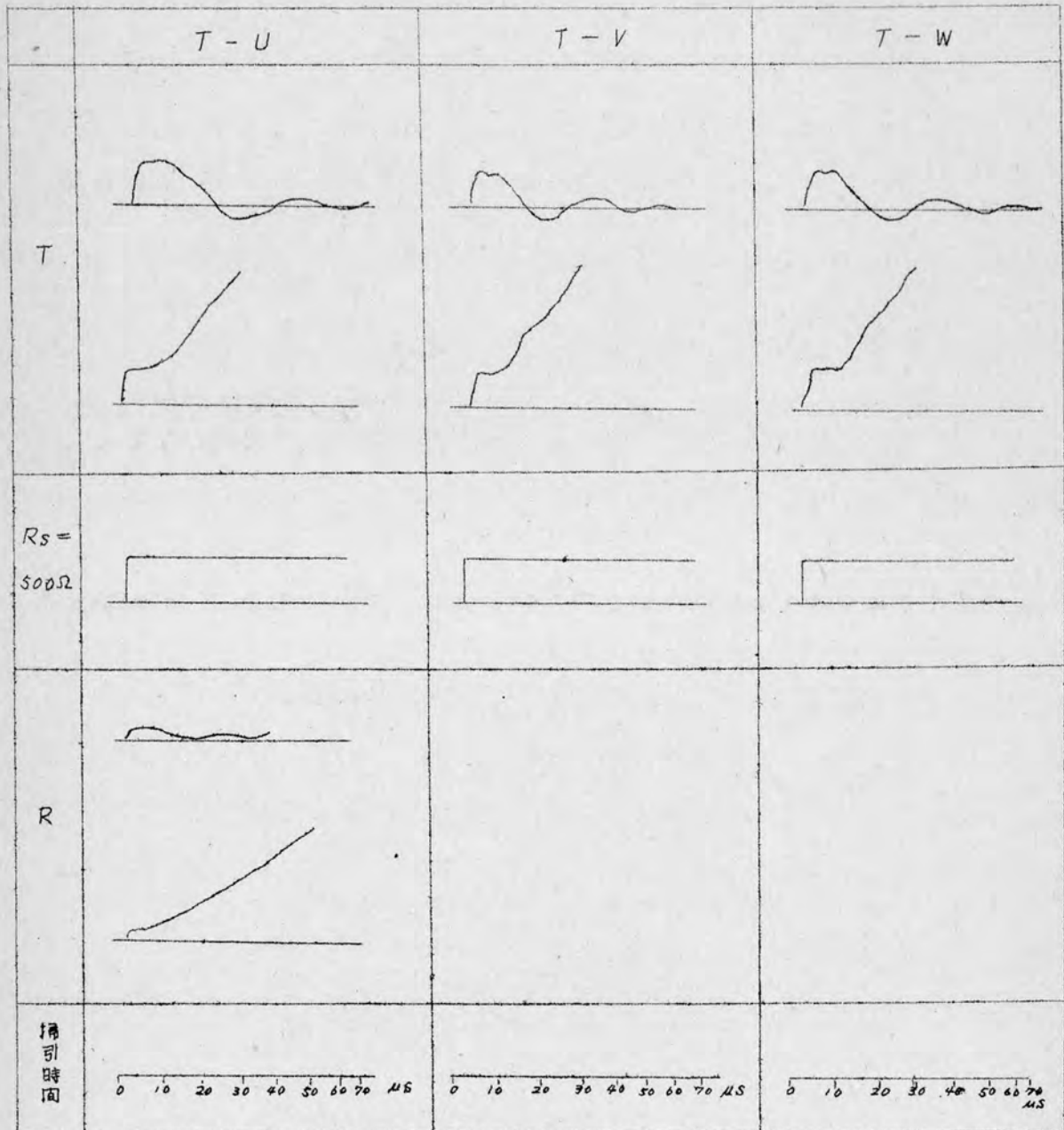
第 2. 16 図 (その 2) (Q-Case)



第 2 . 1 6 図 (その 3)

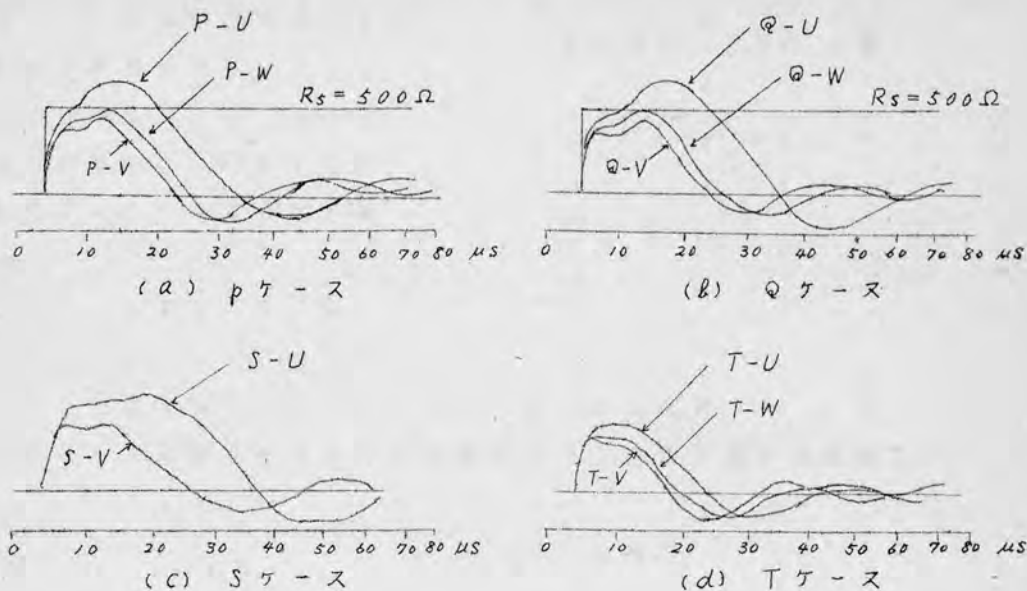


第 2. 16 図 (その 4)



各試験ケース毎に、各相過渡インピーダンスを調べたのが、第2. 17図である。回転子磁極による影響なることがうかがわれる。

第2. 17図



発電機巻線の減衰係数および巻線と往復する時間を表にしたのが第2. 10表である。

第2. 10表

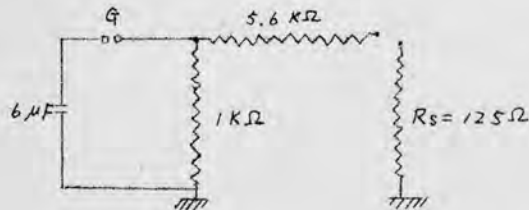
試験ケース	供試相	減衰係数	巻線と往復する時間 (μs)
P	U	0.71	15
	V	0.61	10
	W	0.65	12.5
Q	U	0.70	/
	V	0.73	
	W	0.70	
R	/	0.67	/
S	U	0.70	/
	V	0.74	
	W	0.69	
T	U	0.68	/
	V	0.50	
	W	0.60	

過渡波動

§5. 11,000 V, 20,000 KVA 発電機インデューシャル・インピーダンス

当該発電機は制動巻線を有する発電機である。測定回路は第2.18図に示

第2.18図 測定回路



す。実測結果は第2.19図に示した。当該発電機の測定に当っては、時間の余裕がないので回転子磁極と各相巻線の相対位置を調査することができなかった。

単位電流を流入してから5 μs

附近のサージインピーダンスを

示したのが、第2.11表である。なお1/4波長に対する振動数をも示してお

いた。さらに巻線の減衰係数および伝播速度を求めたのが第2.12表である。

第2.11表

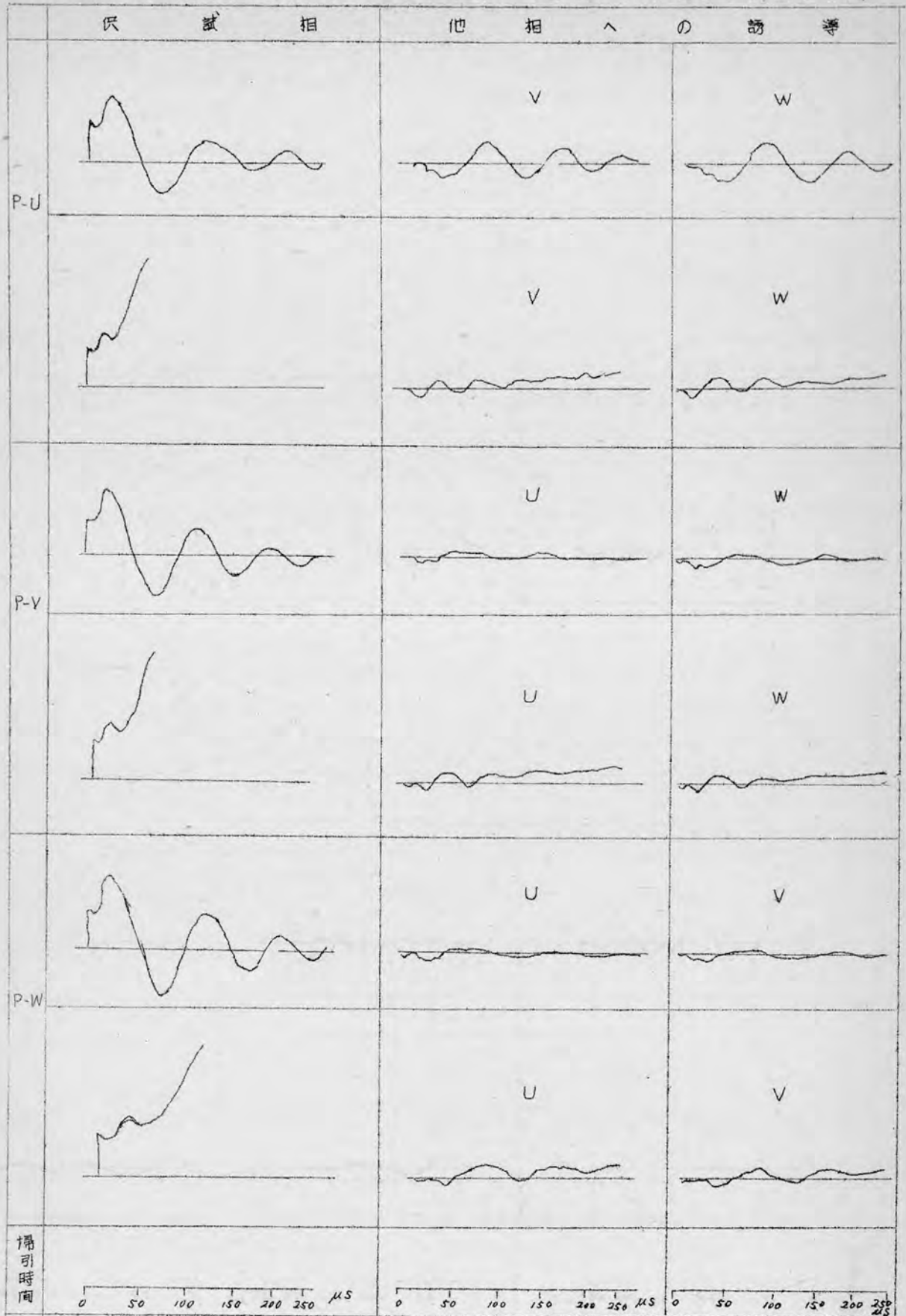
試 験 ケ ー ス	供 試 相	第1回目の測定		第1回目の測定、磁極の位置 をだけ移動した場合	
		波動インピー ダンス(Ω)	1/4波長振 動数(KC)	波動インピー ダンス(Ω)	1/4波長振 動数(KC)
P	U	94	11.1	94	11.1
	V	"	"	"	"
	W	"	"	"	"
Q	U	"	10.0	"	10.0
	V	"	"	"	"
	W	"	"	"	"
R		31.3	15.4	31.3	15.4

第2.12表

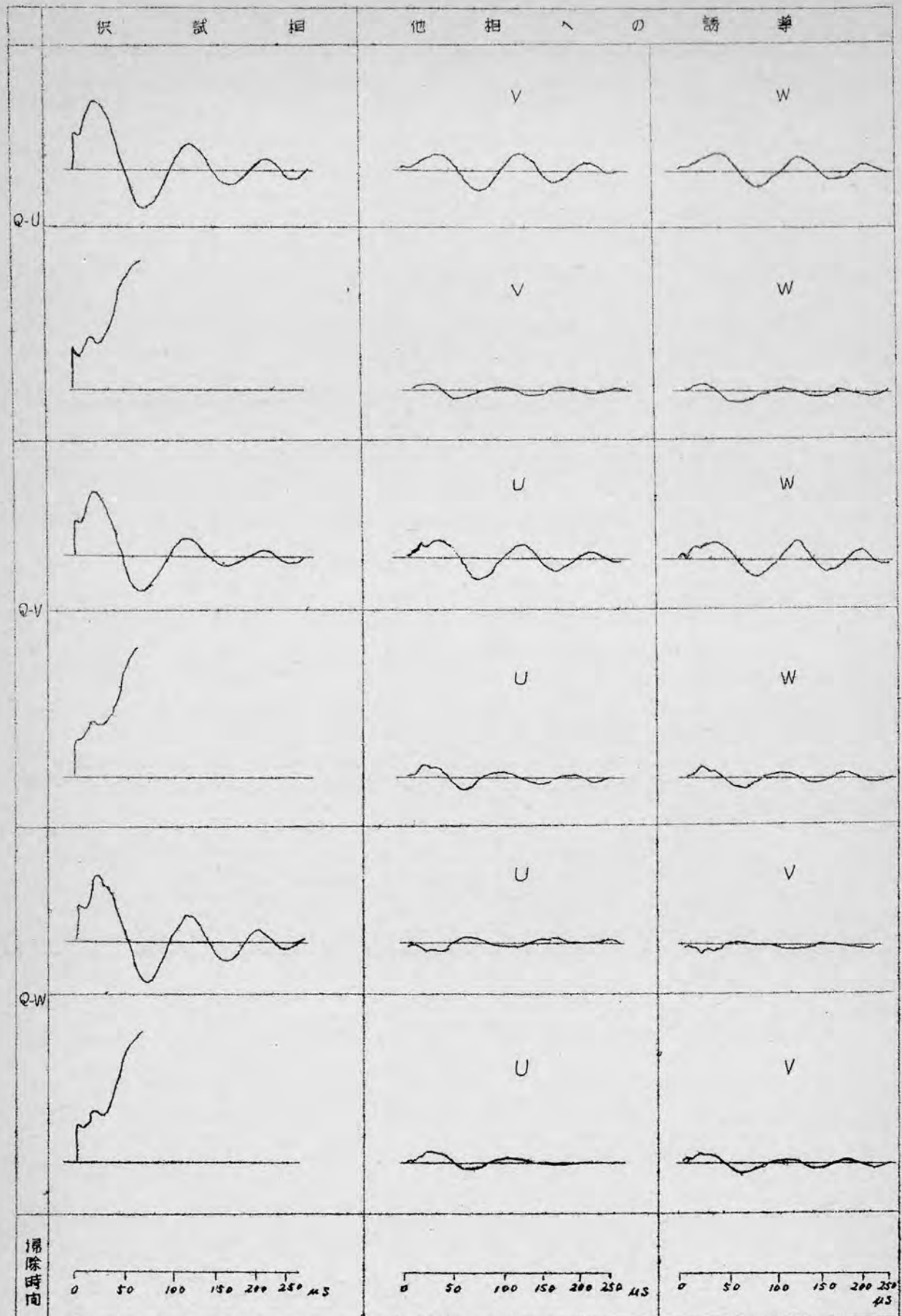
試験ケース	供 試 相	減 衰 係 数	伝 播 速 度 (m/μs)
P	U	0.50	26
	V	0.42	25.4
	W	0.39	31.2
Q	U	0.44	
	V	0.46	
	W	0.37	
R		0.49	

第 2. 19 図 (その 1) (p-case)

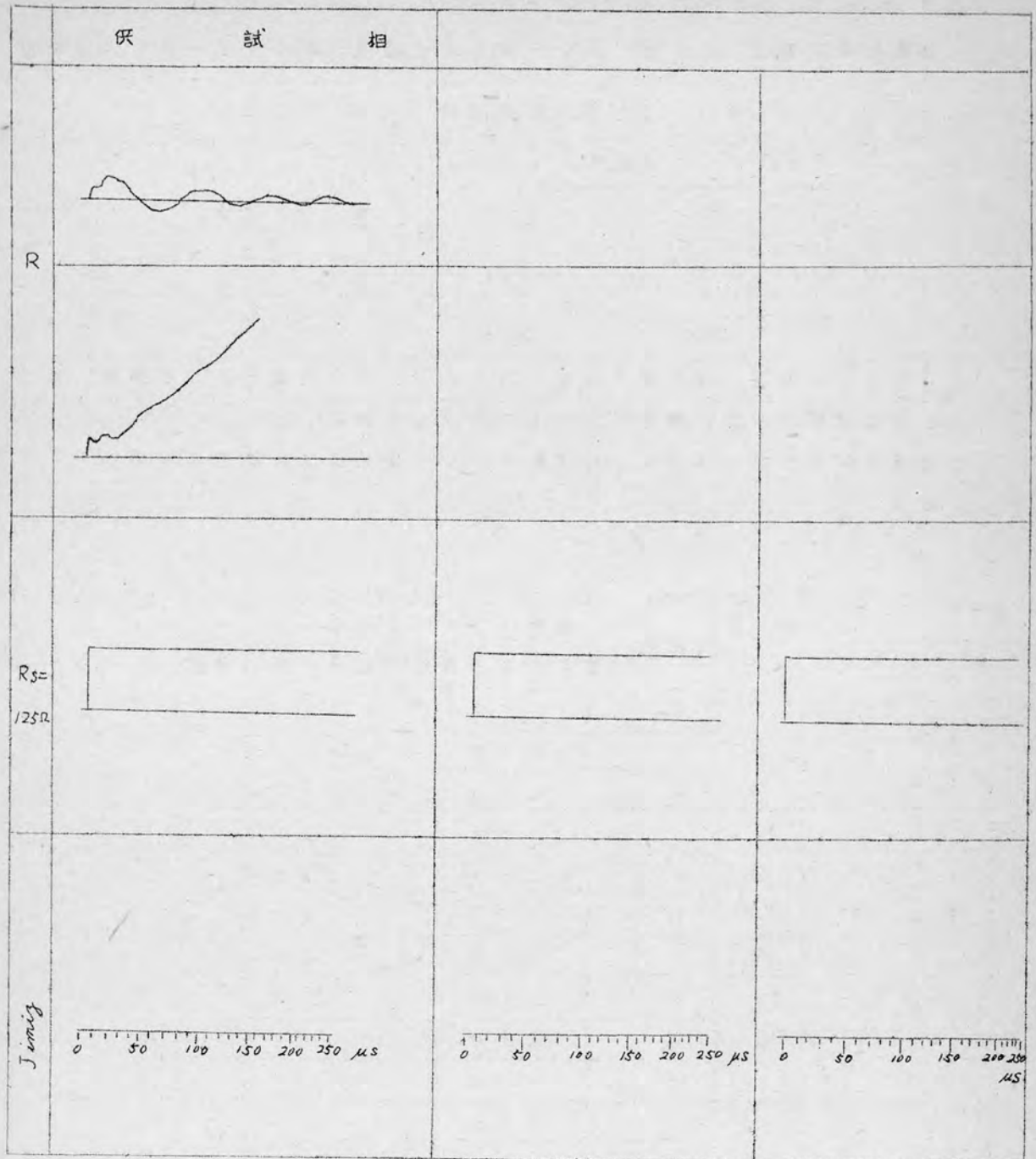
11,000 V, 20,000 KVA ^{過渡変動}インディシャル・インピーダンスオッシログラム



第 2 . 19 図 (その 2) (Q-case)



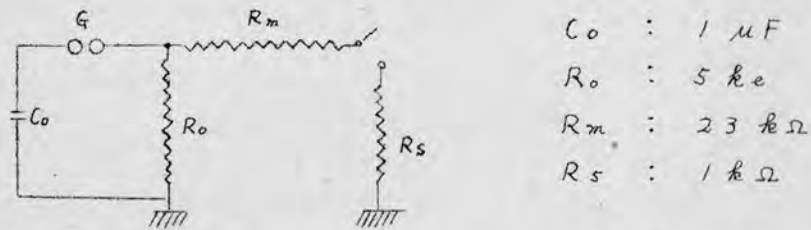
第 2. 19 図 (その 3)



§.2.7. 11,000 V, 1000KVA 発電機 ^{過渡波動}インディシヤル・インピーダンス

測定回路は第2.20図に示す。測定した過渡波動インピーダンスは第2.

第2.20図 測定回路



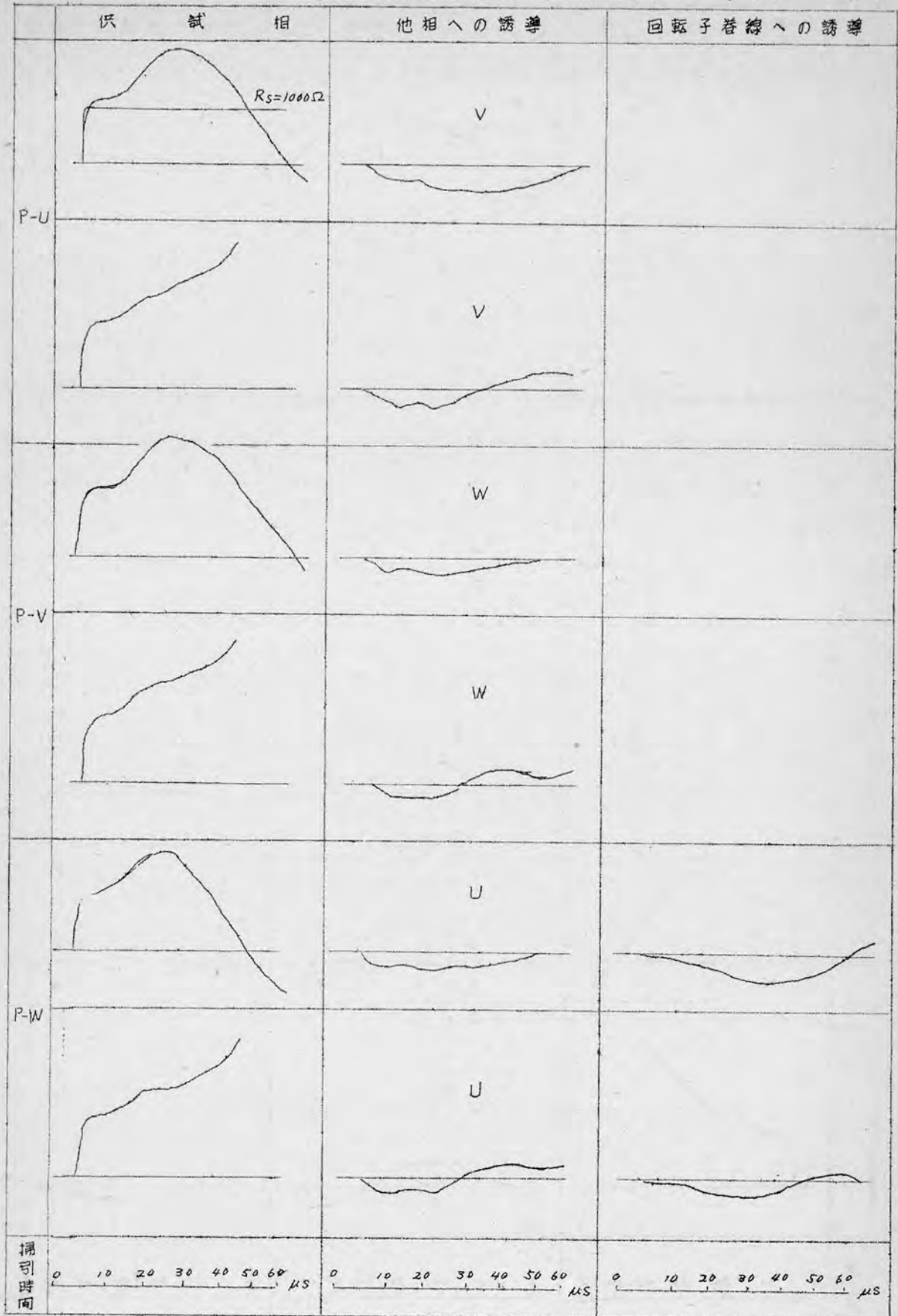
21図および第2.20図に示す。第2.21図は回転子がある場合、第2.22図は回転子がない場合のオシログラムである。

過渡波動インピーダンスより波動インピーダンスを求めたのが第2.13表である。

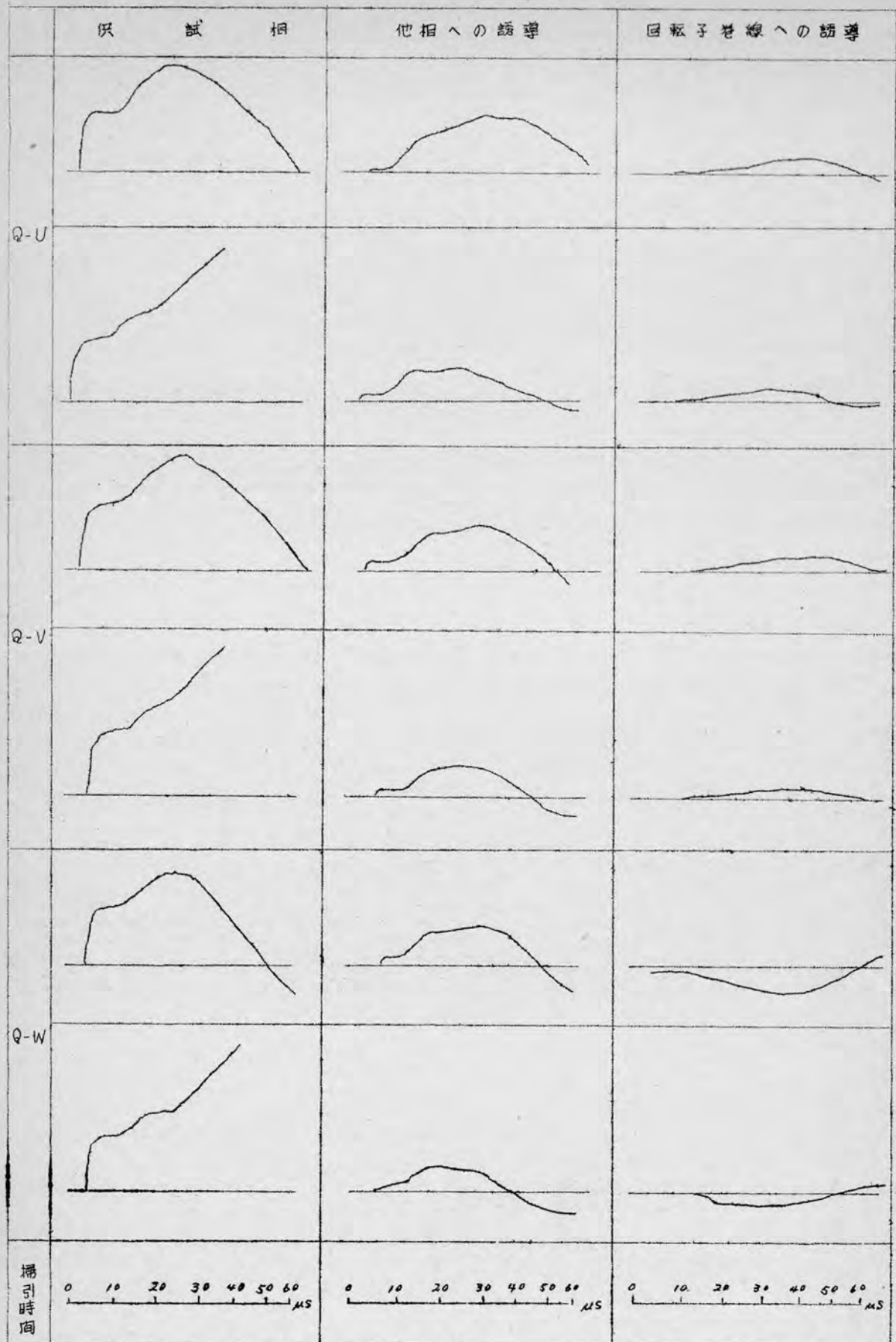
試験 ケース	供試相	波動インピーダンス (Ω)	
		回転子がある場合	回転子がない場合
P	U	1150	1100
	V	1200	1100
	W	1100	1100
Q	U	1150	1050
	V	1200	1050
	W	1100	1050
R		300	300
S	U	1150	
	V	1200	
	W	1100	
T	U	1050	
	V	1100	
	W	1000	

第2. 21図 (その1)

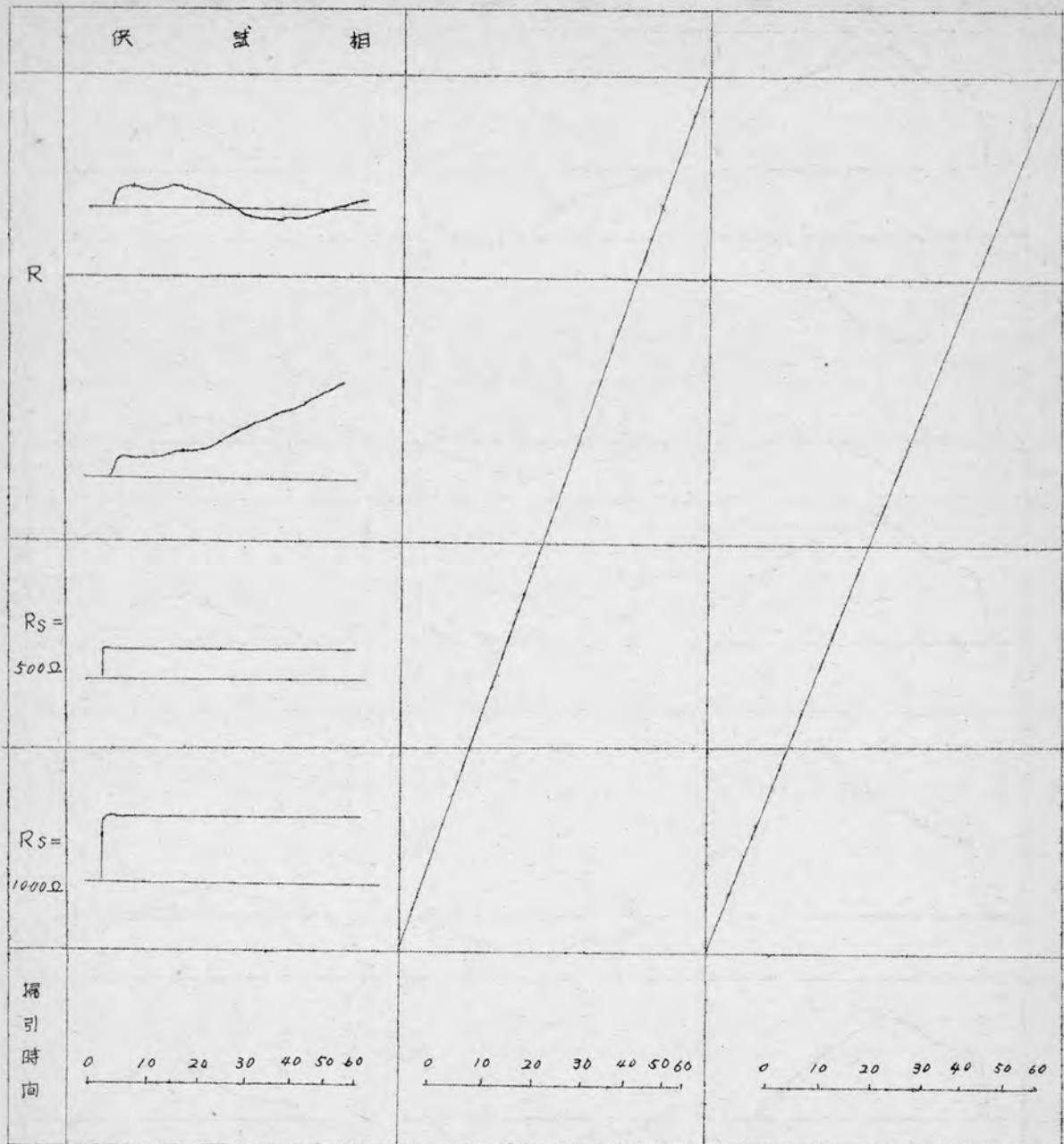
11,000 V, 1,000 KVA 回転子がある場合のインディシャル・インピーダンス



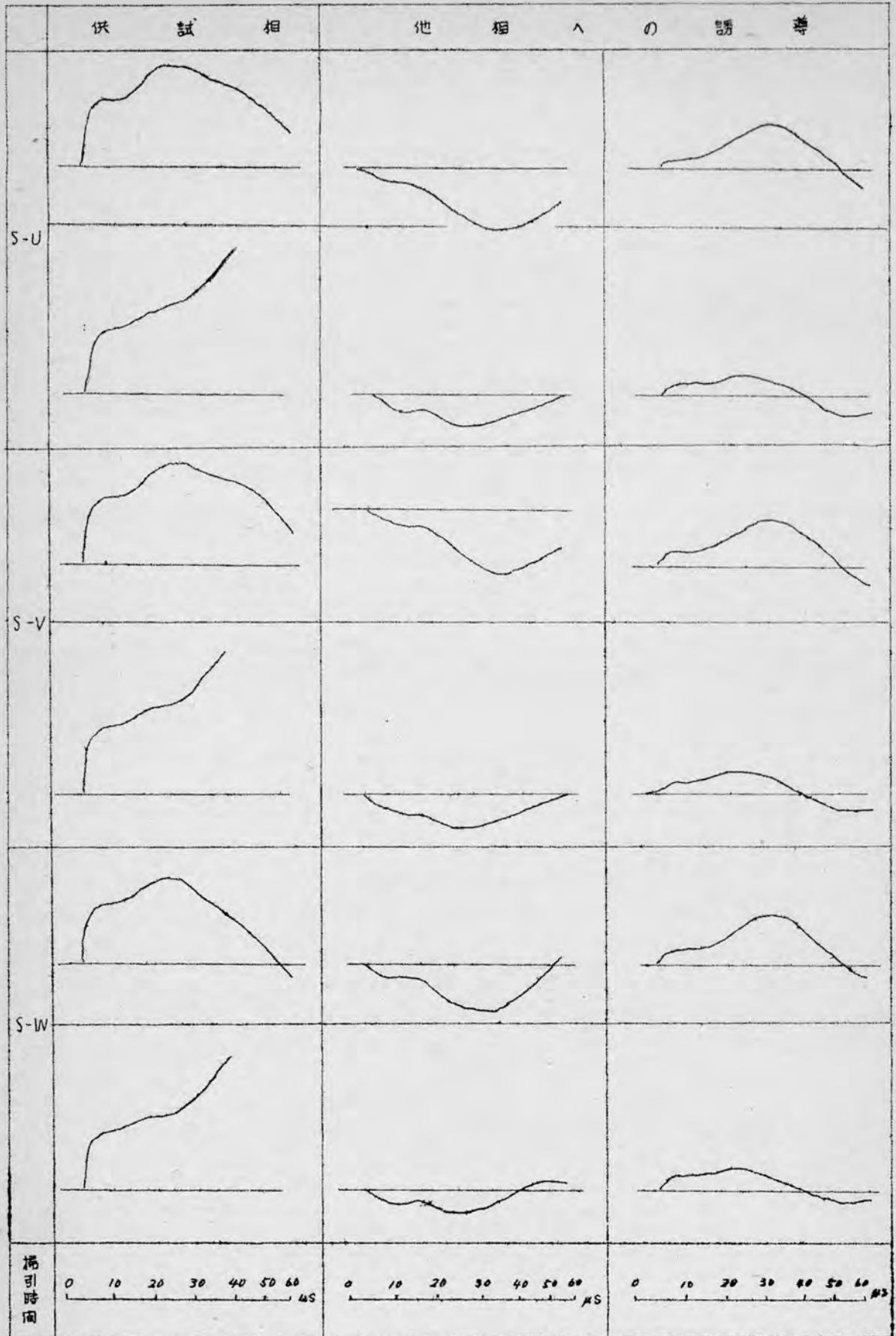
第 2. 21 図 (その 2)



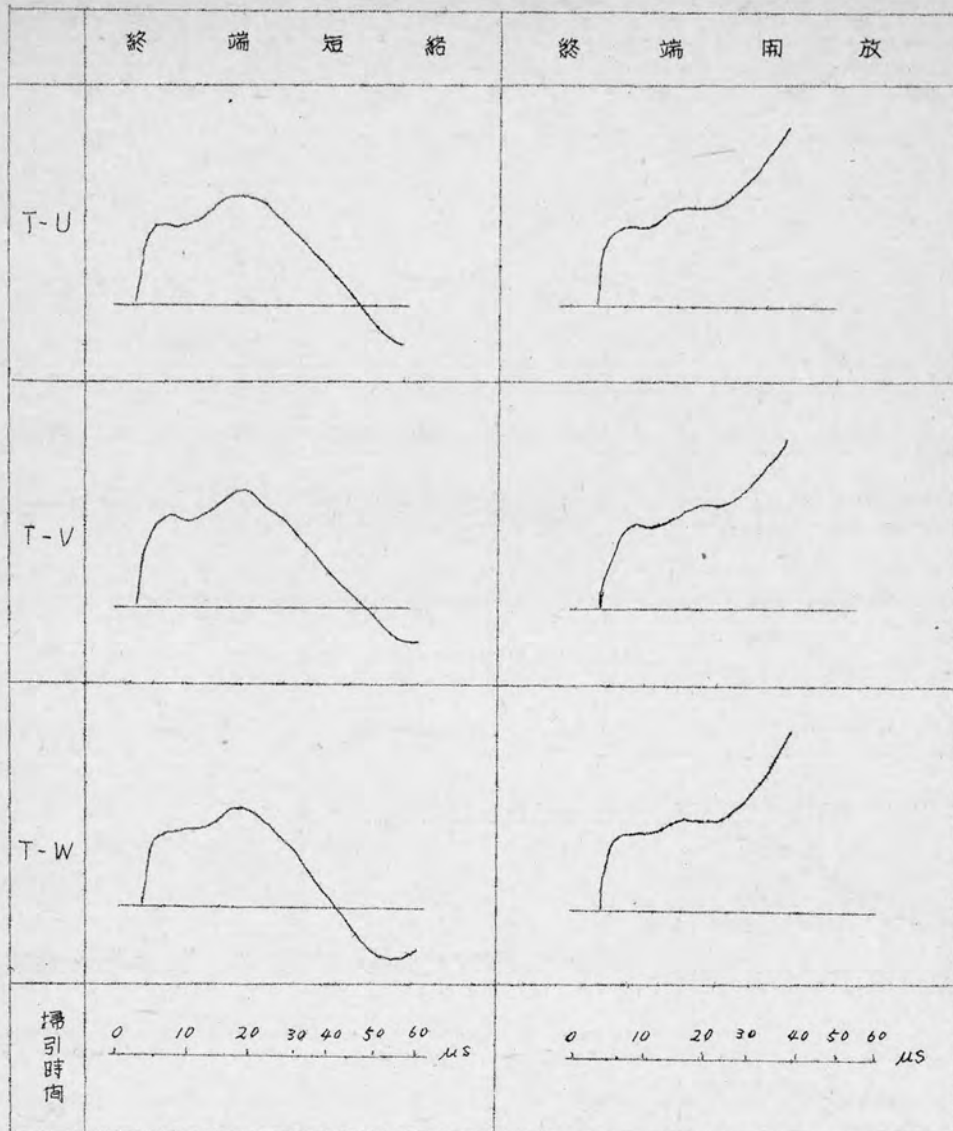
第 2. 21 図 (その 3)



第 2 . 2 1 図 (その 4)

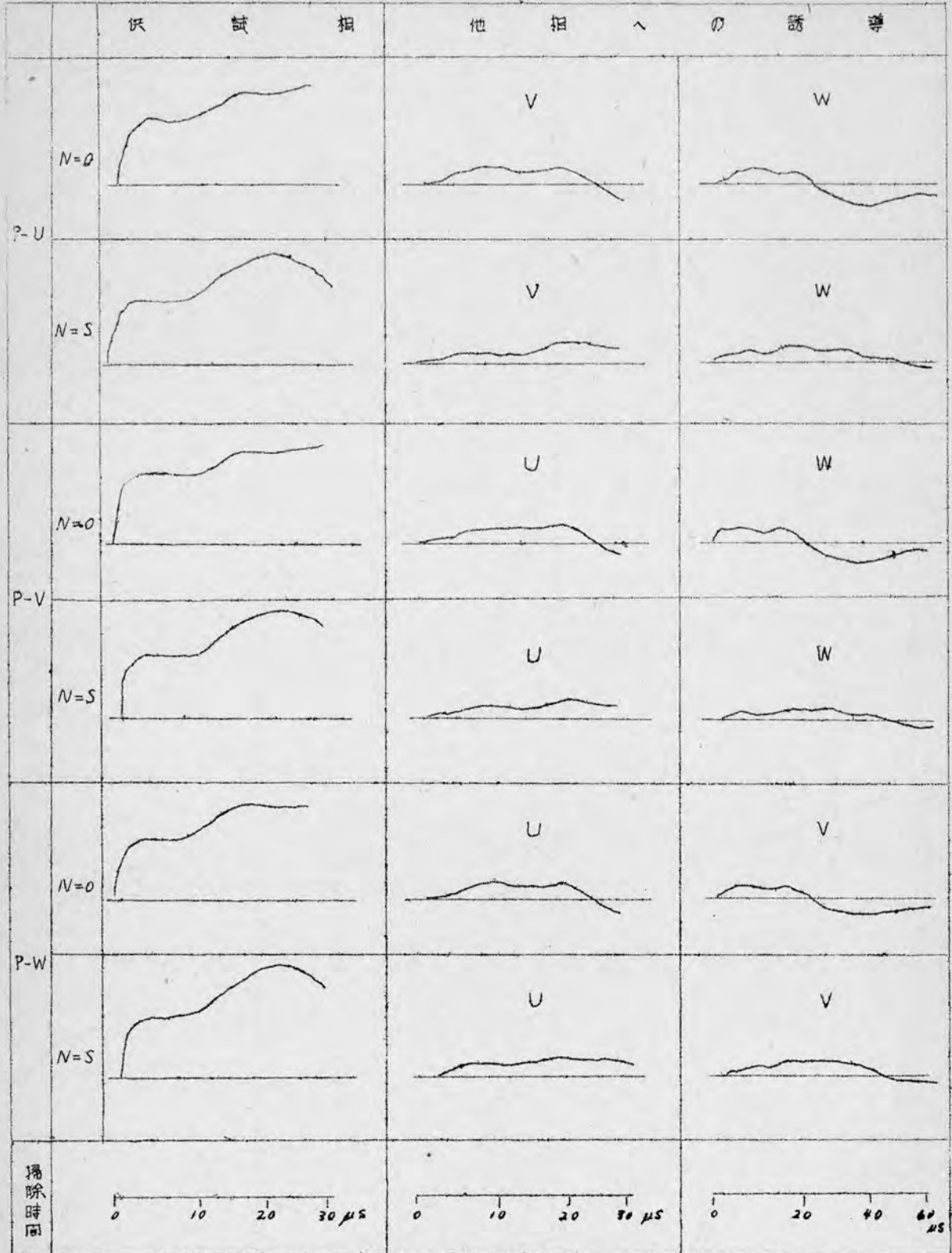


角 2 . 2 1 図 (その 5)

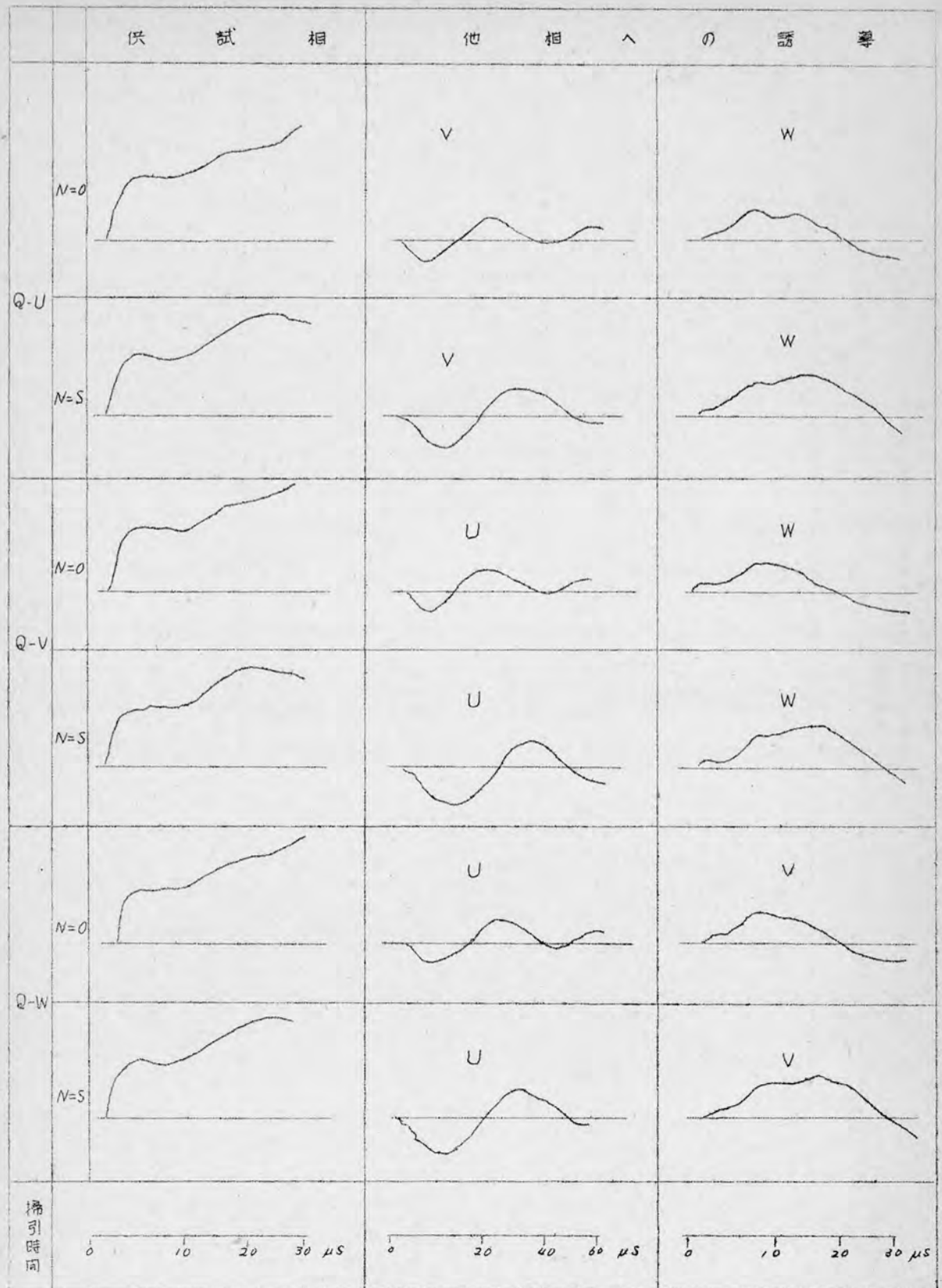


用 2. 22 図 (その 1)

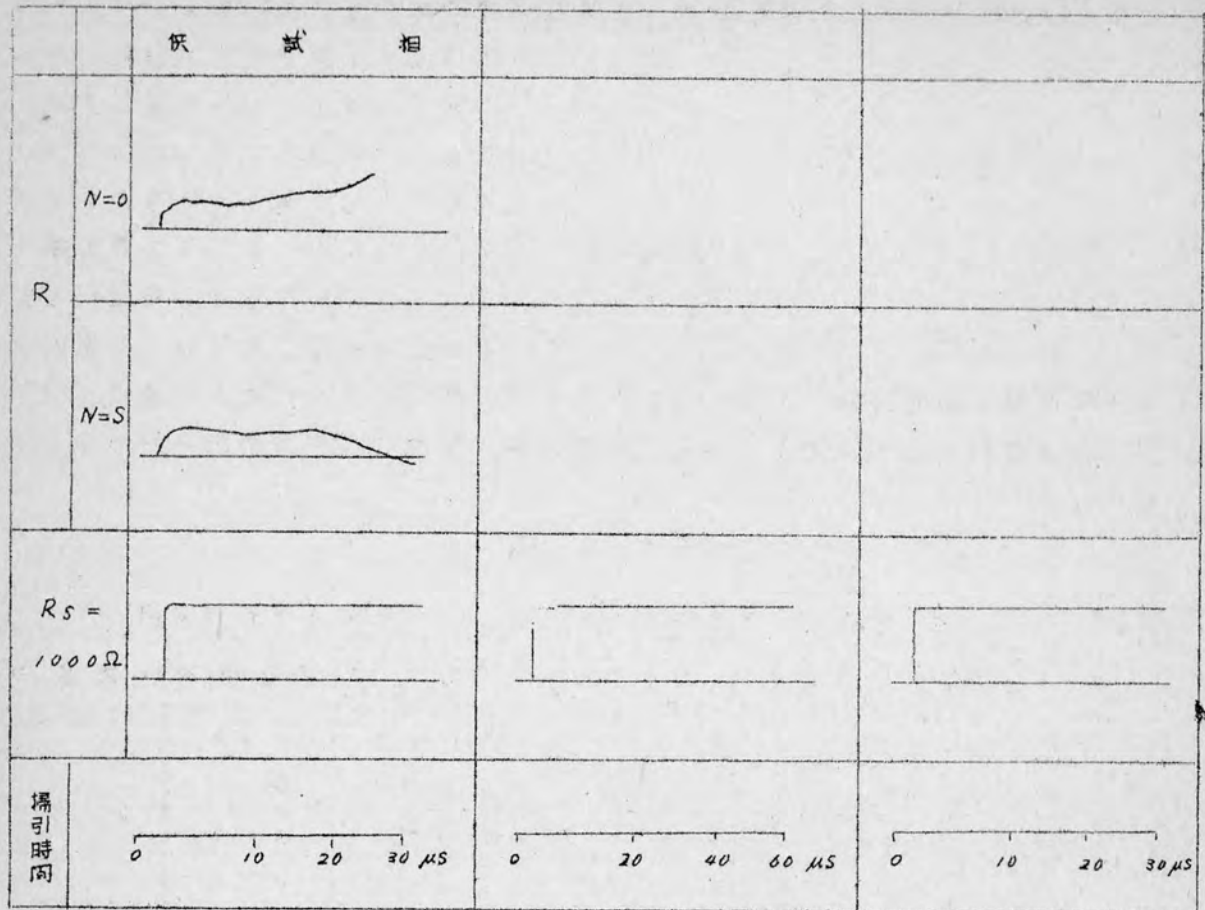
11,000 V, 1,000 KVA 回転子がない場合のインディシャル・インピータンス



第 2. 22 図 (その 2)



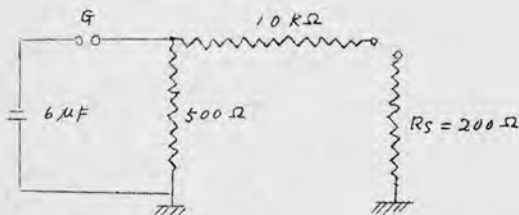
第 2. 2 2 図 (その 3)



§2.8 11,000V, 15,000KVA発電機の過渡波動インピーダンス

測定回路は第2.23図に示す。当該発電機巻線の過渡波動インピーダンス

第2.23図



は回転子がある場合と回転子を取り除いた場合について測定した。

第2.24図のオシログラムが回転子がある場合の試験ケースP, QおよびRについての過渡波動インピーダンスである。第2.25図が、回転子を取り除いた場合の

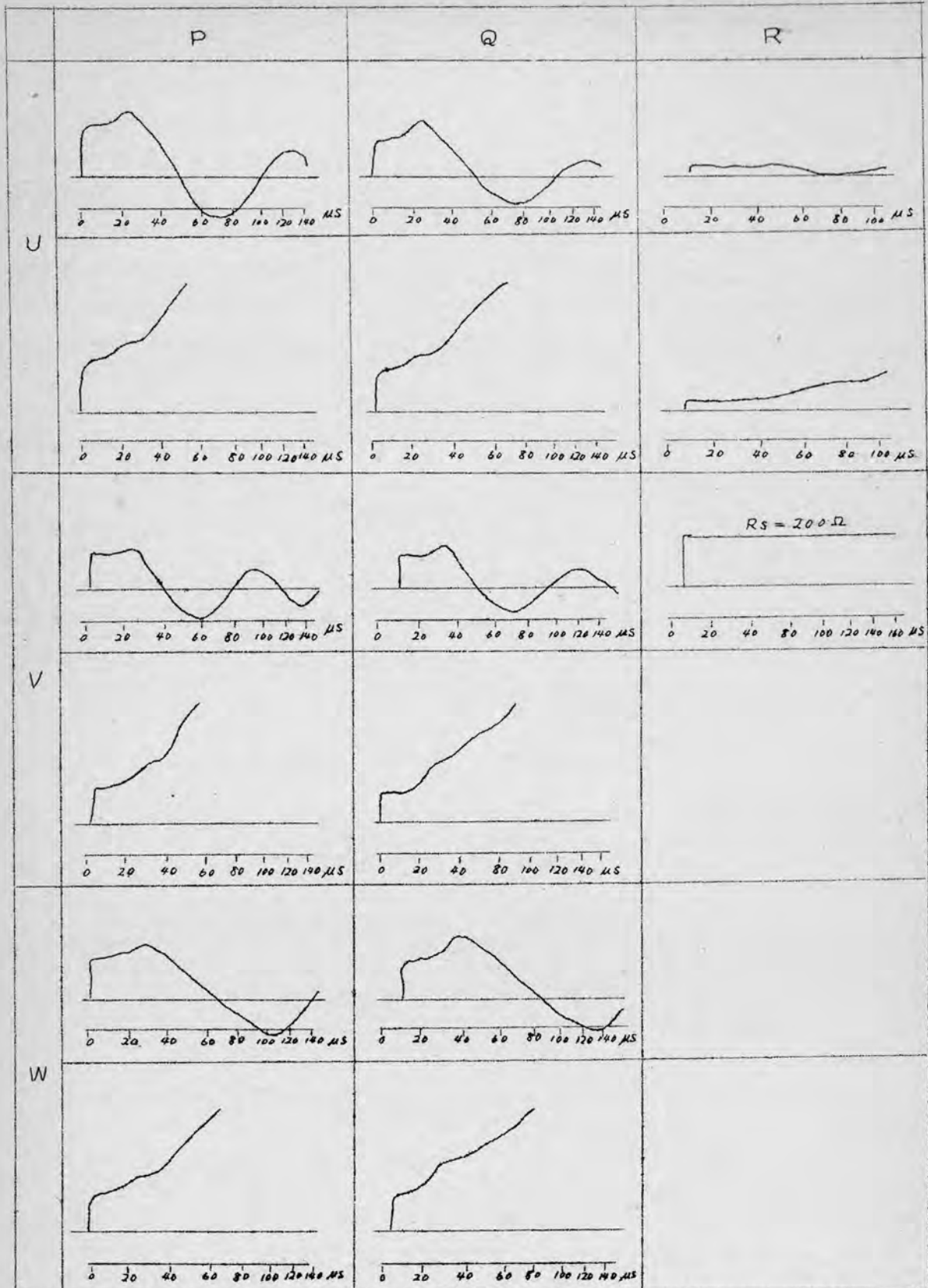
発電機巻線の過渡波動インピーダンスである。第2.24図および第2.25図より巻線の波動インピーダンス, 減衰係数, 伝播速度を求めたのが第2.14表である。

第2.14表

試験 ケース	仮 試 担	回転子がある場合			回転子がない場合		
		波動インピー ダンス(Ω)	減衰係数	伝播速度 (μs)	波動インピー ダンス(Ω)	減衰係数	伝播速度 (μs)
P	U	210	0.36	36	170	0.11	36
	V	160	0.15	36	170	0.11	36
	W	180	0.34	36	170	0.19	34
Q	U	170	0.50	/	150	0.20	/
	V	130	0.36		150	0.21	
	W	150	0.45		150	0.33	
R		45			46		

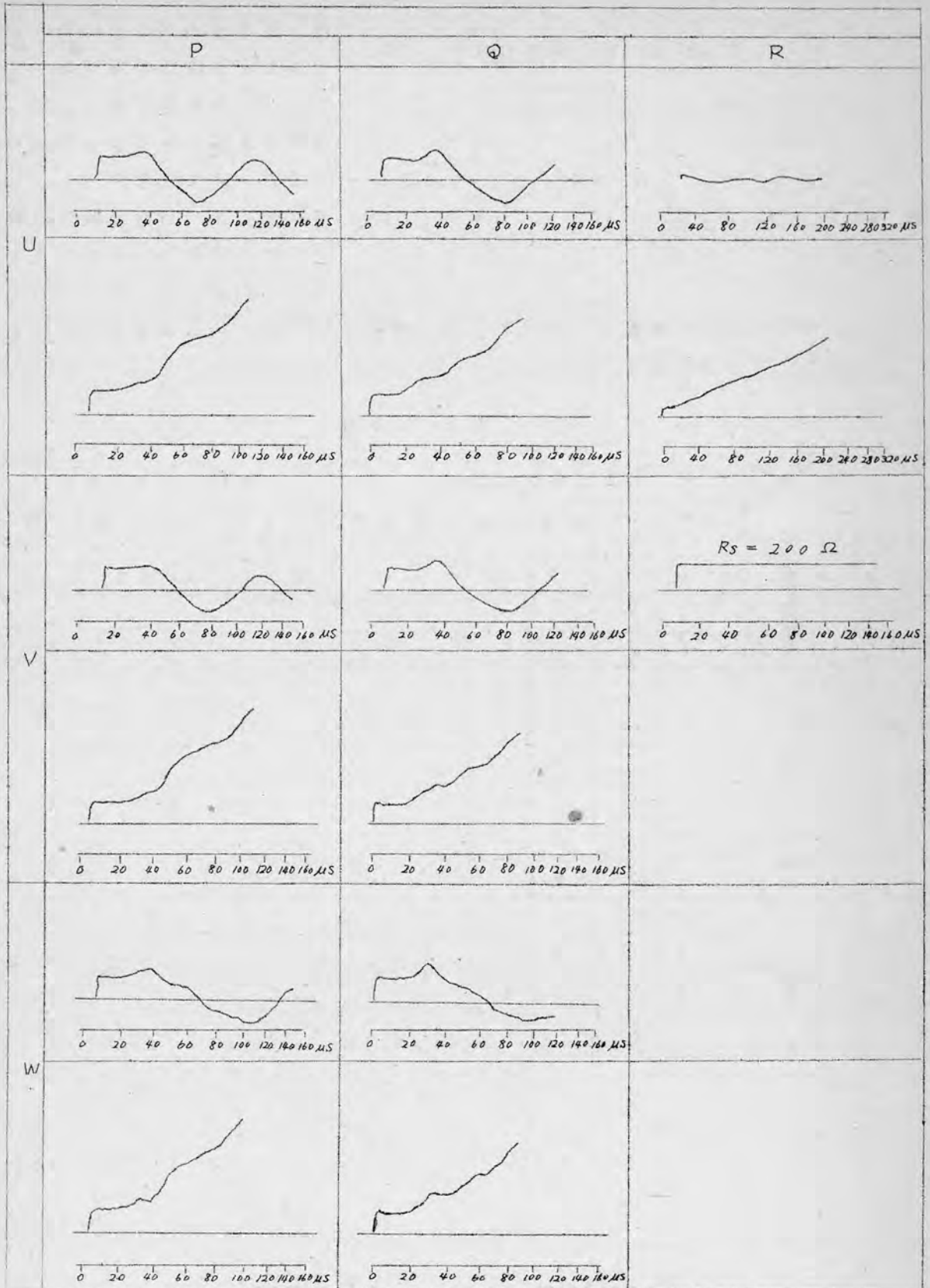
第 2. 24 図

11,000 V. 15,000 KVA 回転子がある場合のインディシャル・インピタンス



第 2. 25 図

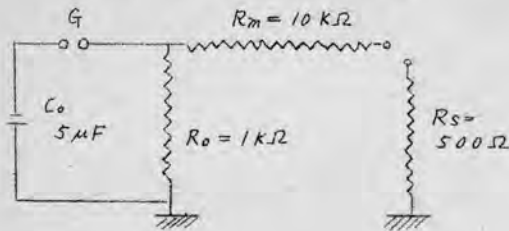
11.000 V. 15.000 KVA 回転子がない場合のインディシヤル・インピーダンス



§2. 9 6.600 V 4375 KVA 発電機の過渡波動，インピーダンス

測定回路は第 2. 26 図に示す。試験ケースは S, T 及び R で、回転子がある

第 2. 26 図 測定回路



場合は巻線の端子を短絡，開放して回転子巻線の過渡波動インピーダンスへの影響を調べた。

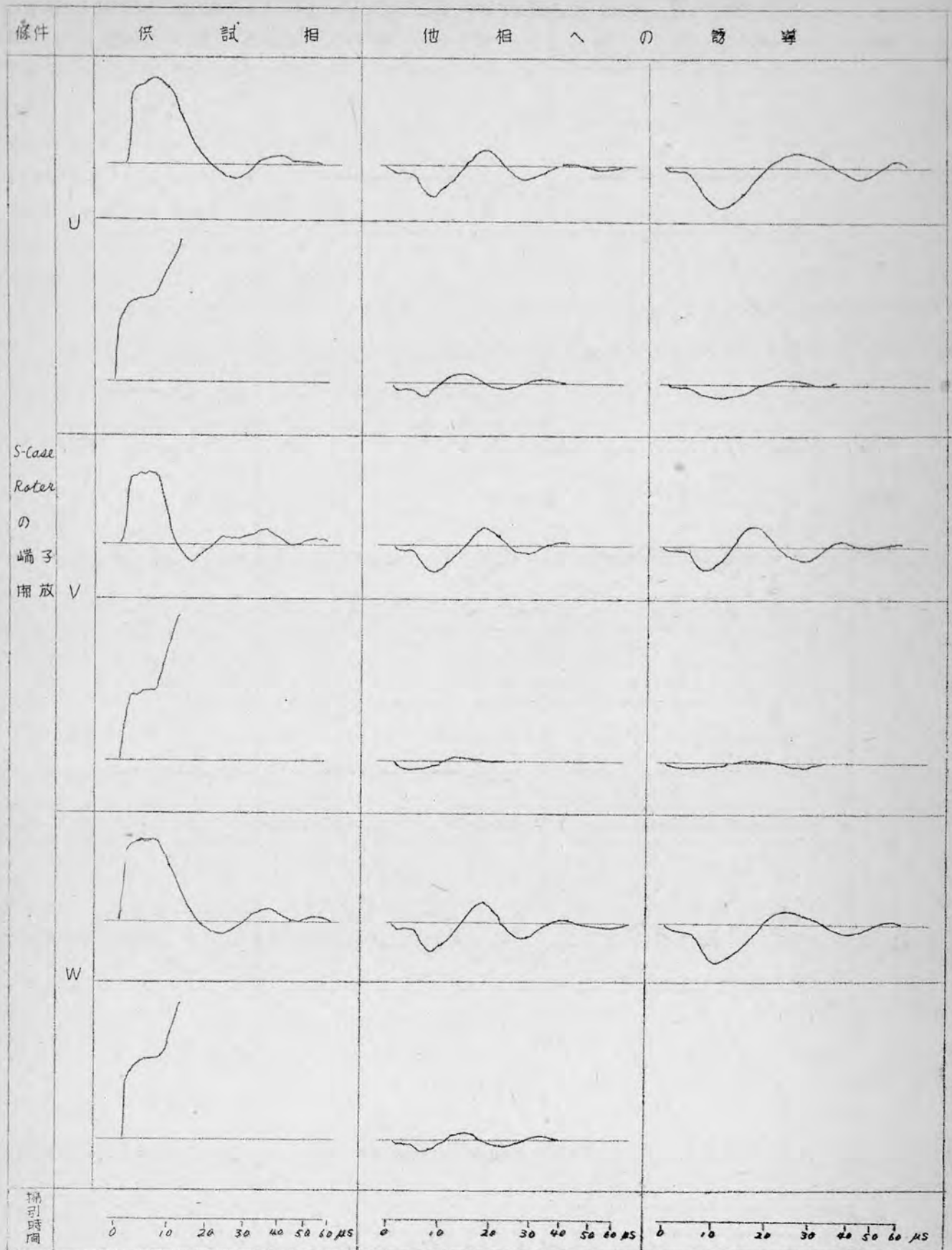
回転子巻線がある場合の過渡波動インピーダンスを第 2. 27 図に回転子がない場合の過渡波動インピーダンスのオシログラムを第 2. 28 図に示した。これらオシ

シログラムより波動インピーダンス，減衰係数，および伝播速度を求めたのが第 2. 15 表である。

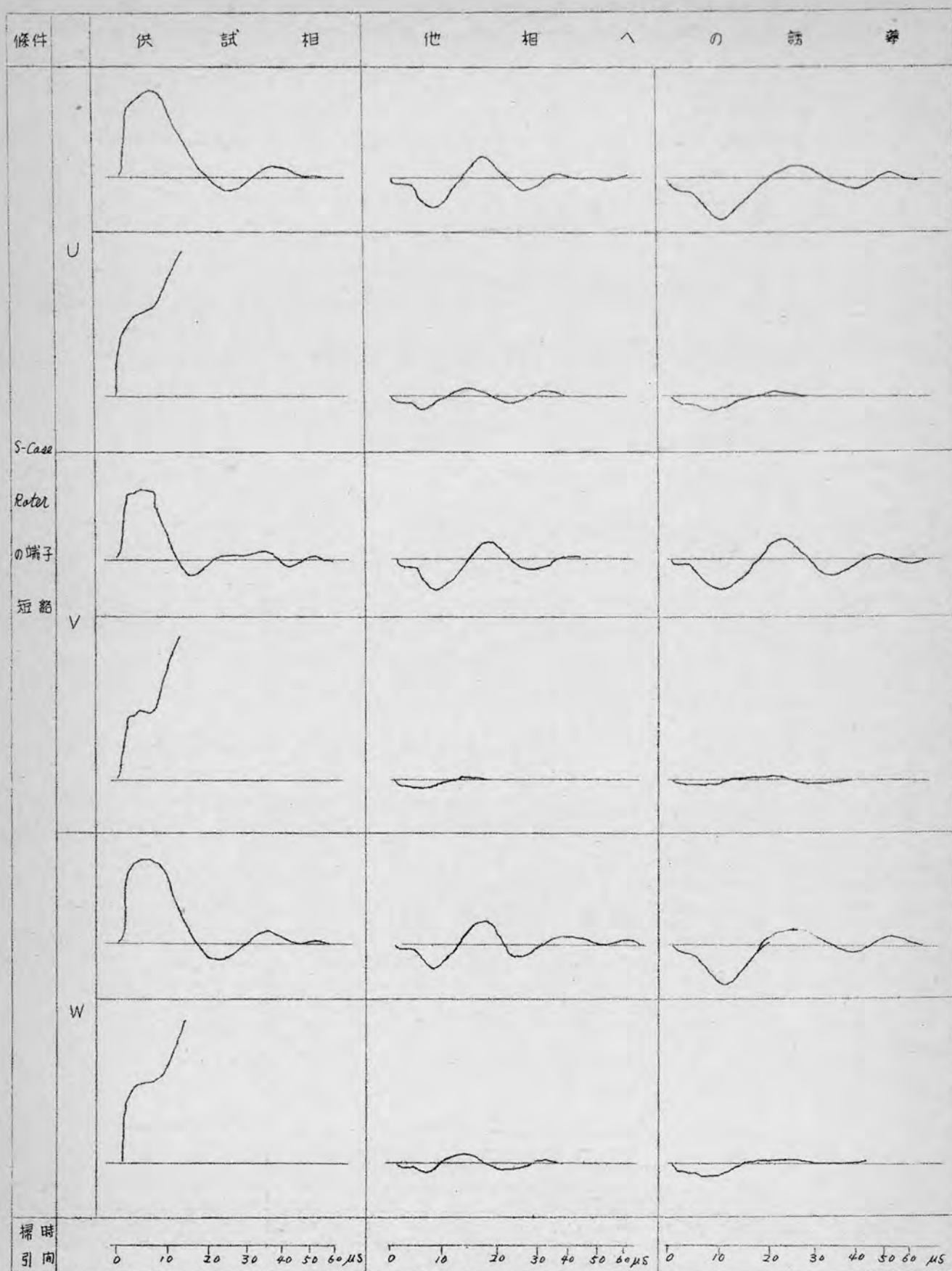
第 2. 15 表

試 験 ケ ー ス		供 試 相	回 転 子 が あ る 場 合			回 転 子 が な い 場 合		
			波 動 イ ン ピ ー タ ン ス (Ω)	減 衰 係 数	伝 播 速 度 ($m/\mu s$)	波 動 イ ン ピ ー タ ン ス (Ω)	減 衰 係 数	伝 播 速 度 ($m/\mu s$)
S	回 転 子 巻 線 開 放	U	470	0.82	23.5	325	0.55	24
		V	370	0.72	24.0	"	"	24
		W	440	0.80	23.5	"	"	24
	短 絡	U	470	0.82				
		V	370	0.72				
		W	440	0.80				
T	開 放	U	460	0.69		325	0.29	24
		V	350	0.44		325	"	24
		W	430	0.60		325	"	24
	短 絡	U	460	0.69				
		V	350	0.44				
		W	430	0.60				
R			110	0.50		110	0.50	

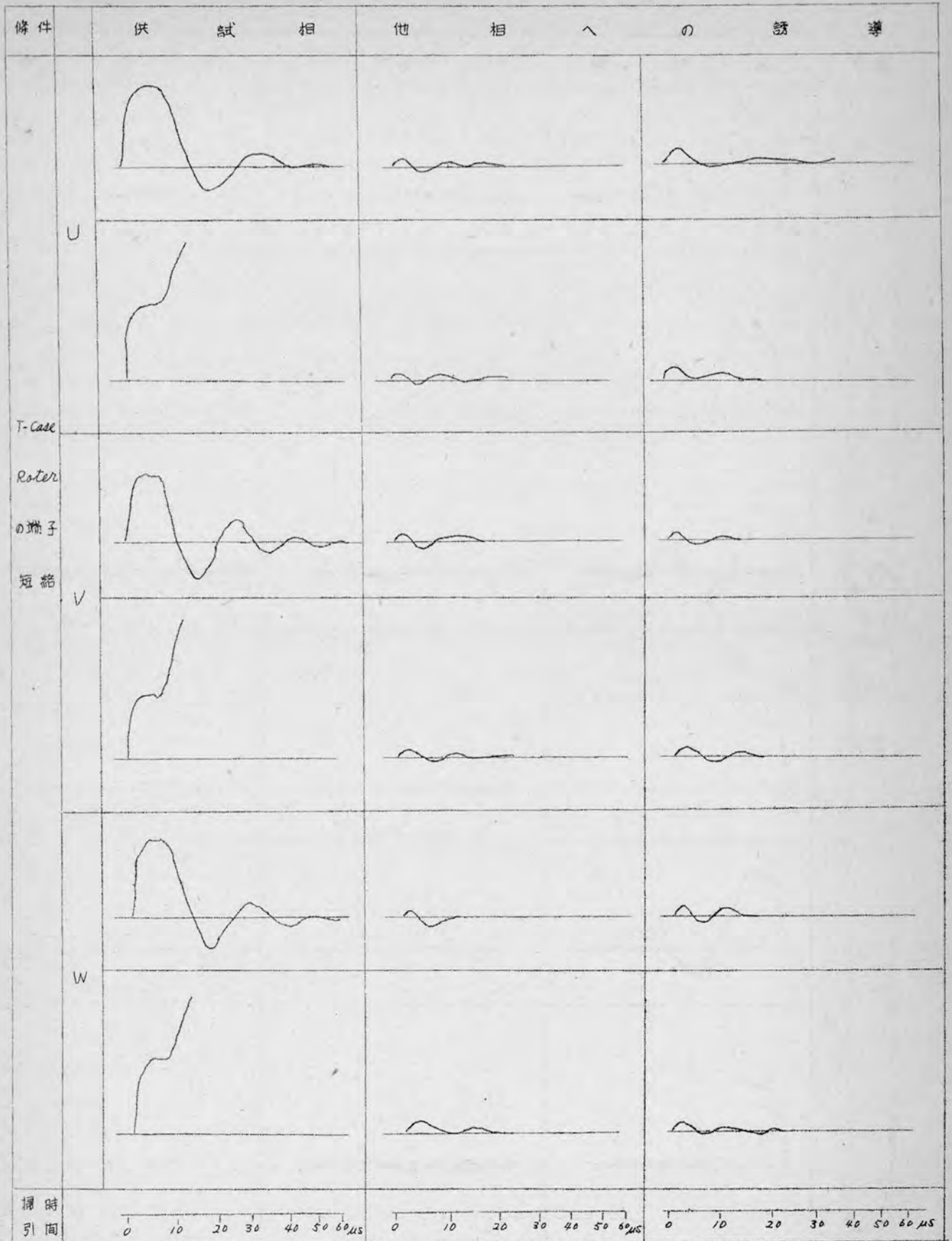
第 2. 27 図 (その 1) (S - Case, Rotor 端子開放)



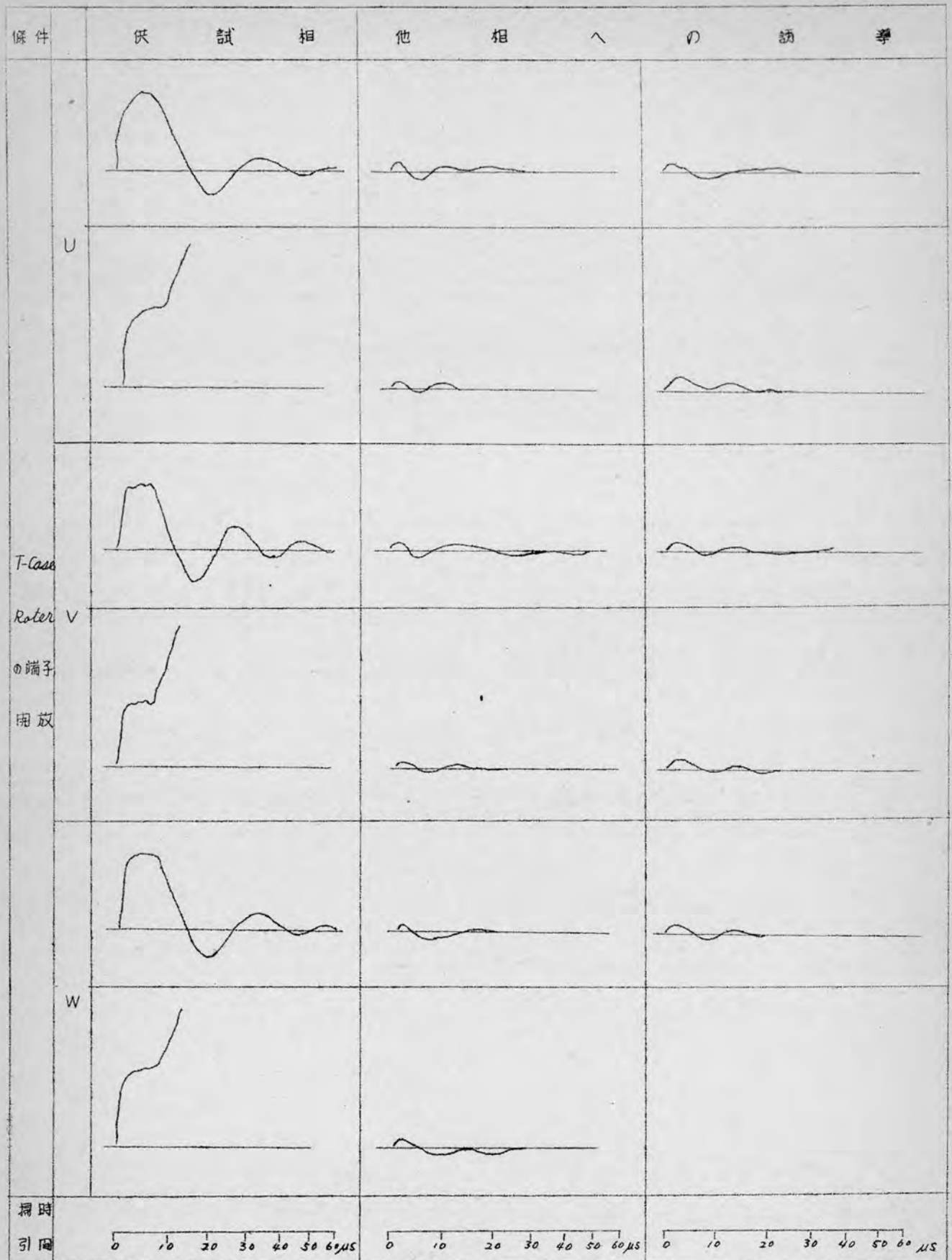
第 2 27 図 (その 2) (S-Case, Roter の端子 短 絡)



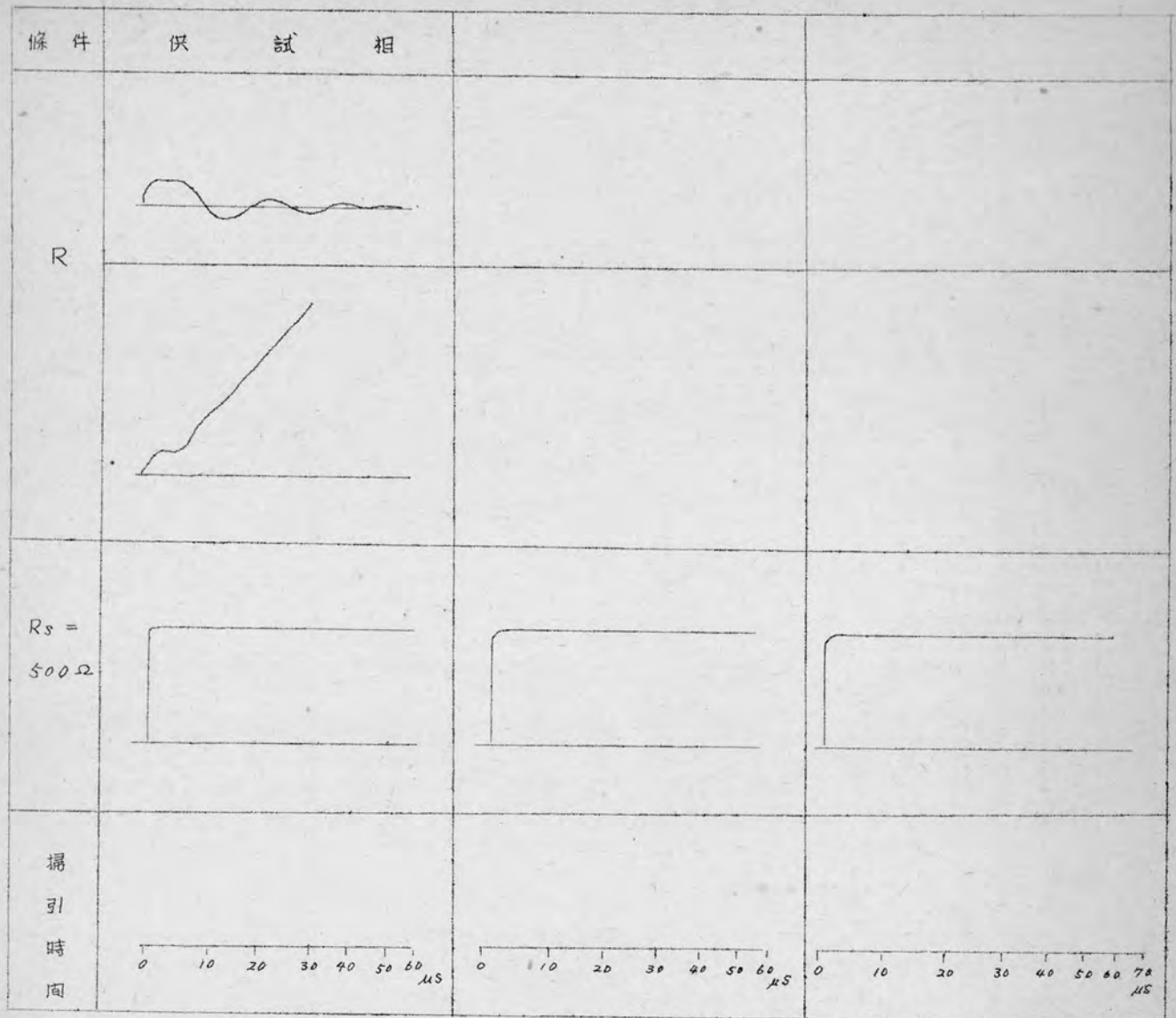
第 2. 27 図 (その 3) (T-Case, Roter の端子短絡)



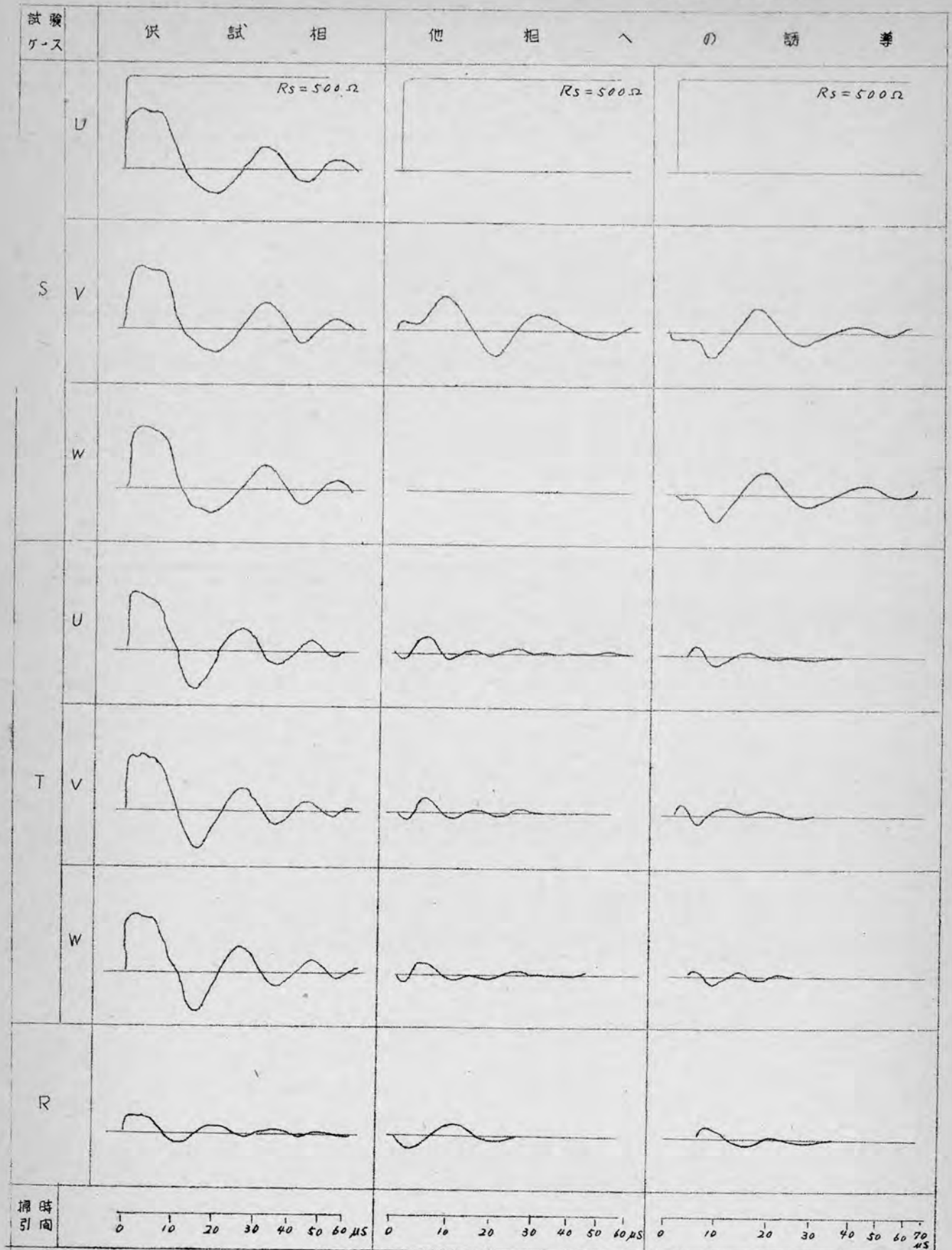
第 2. 27 図 (その 4) (T-Case, Roter の端子開放)



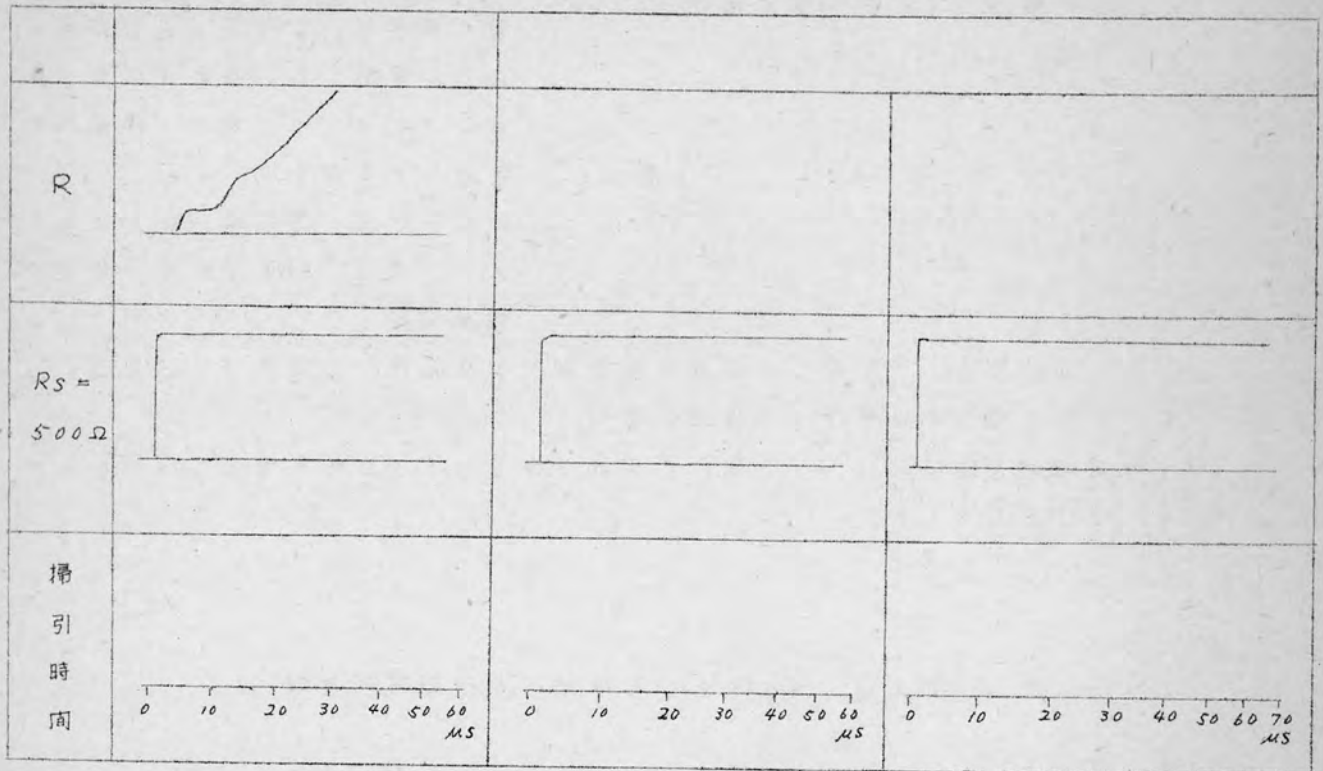
第 2. 27 図 (その 5) (R-Case)



第 2. 28 図 (その 1)
 回転子がない場合のインディシャル・インピーダンス



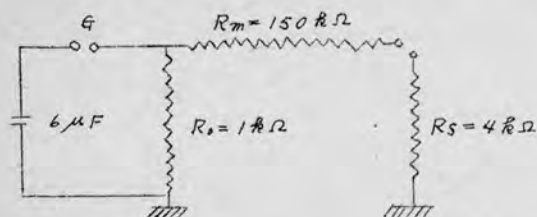
第 2. 28 図 (その 2)



§ 2. 10. 3,300 V, 40 KVA 発電機の過渡波動インピーダンス

測定回路は第 2. 29 図に示す。発電機巻線の過渡波動インピーダンスは回

第 2. 29 図 測定回路

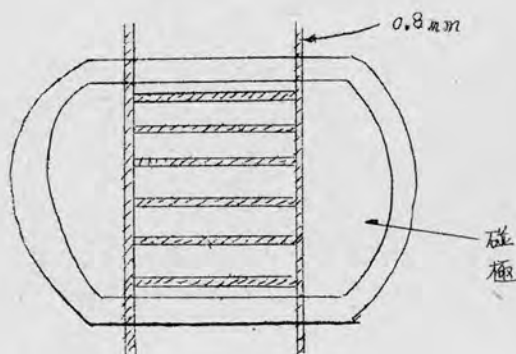


転子がない場合、模擬制動巻線を有する場合、回転子がある場合において実測した。回転子がない場合は $R_m = 150 \text{ k}\Omega$ 、模擬制動巻線がある場合は $R_m = 100 \text{ k}\Omega$ 、回転子がある場合は $R_m = 200 \text{ k}\Omega$ である。回転子がない場合の過渡波動インピーダンスのオシ

ログラムは第 2. 31 図に、模擬制動巻線を有する場合のは第 2. 32 図、回転子がある場合のは第 2. 33 図に示す。

模擬制動巻線は第 2. 30 図に示す如く直径 0.8 mm 軟銅線を一磁極に 6 本とりつけたものである。

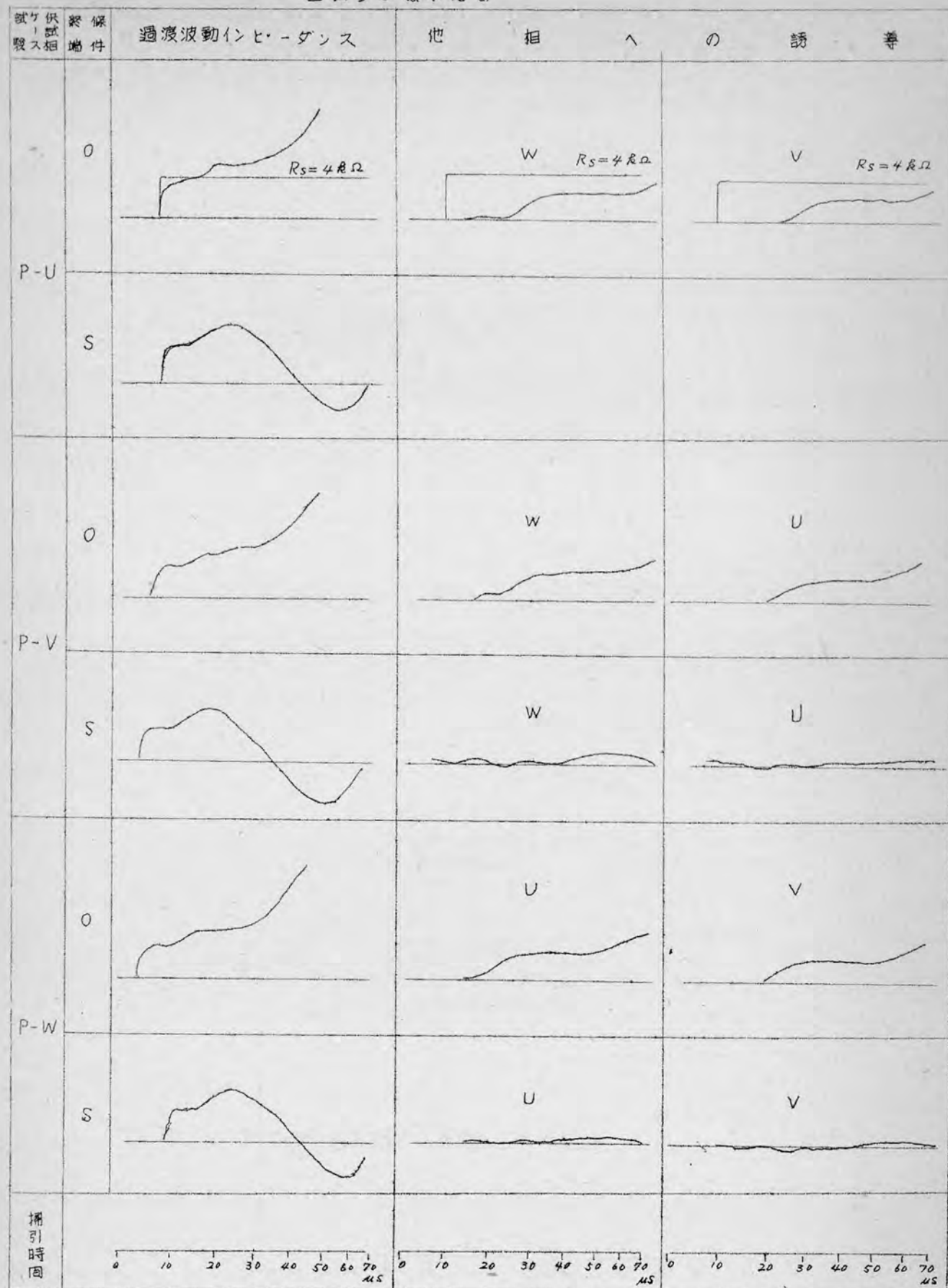
第 2. 32 図 40 KVA に使用した模擬制動巻線



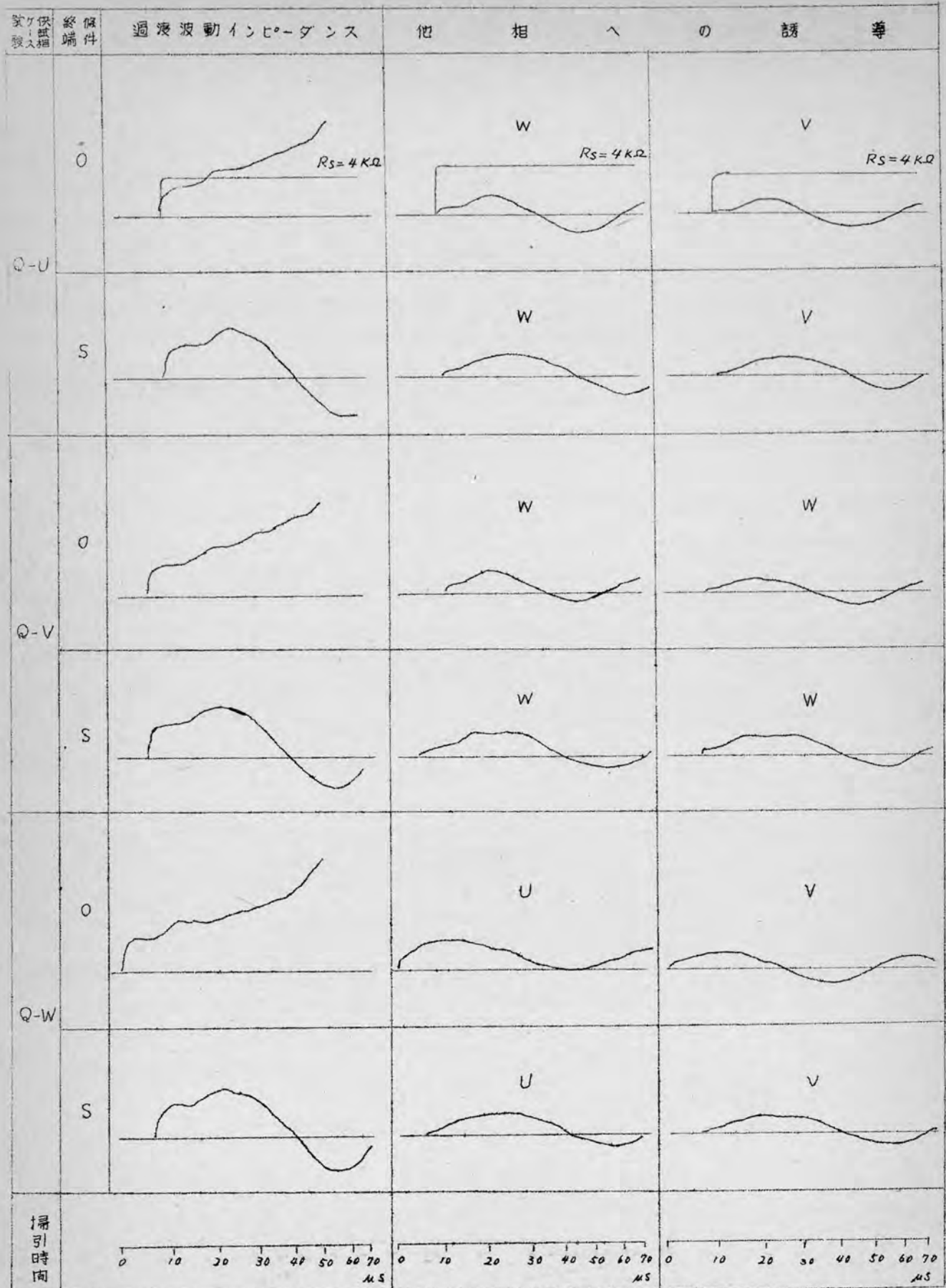
第 2.30 図 40 kVA に使用した模擬制動巻線

第2. 31図 40 KVA 過渡波動インピータンス (その1)

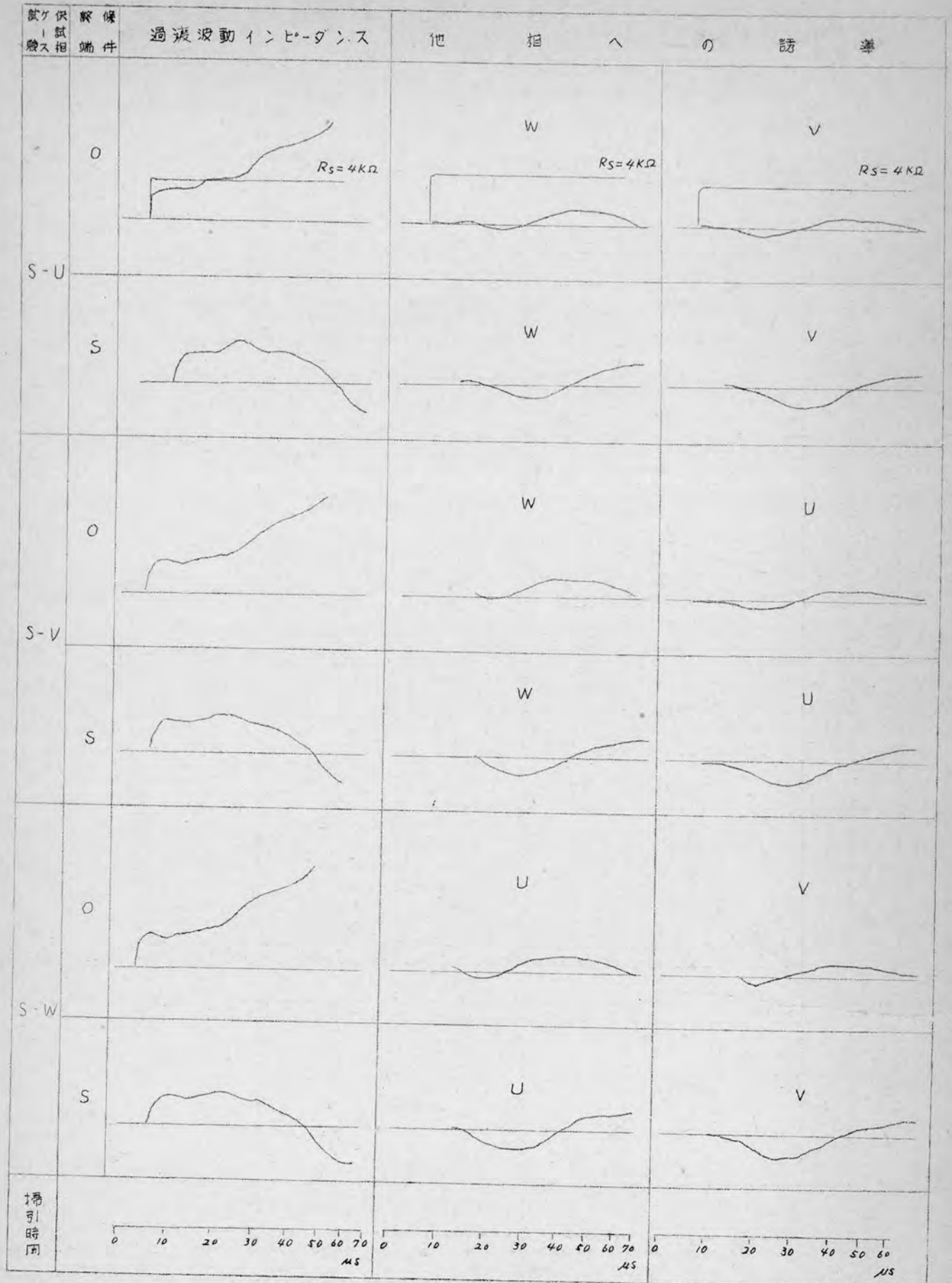
回転子がない場合



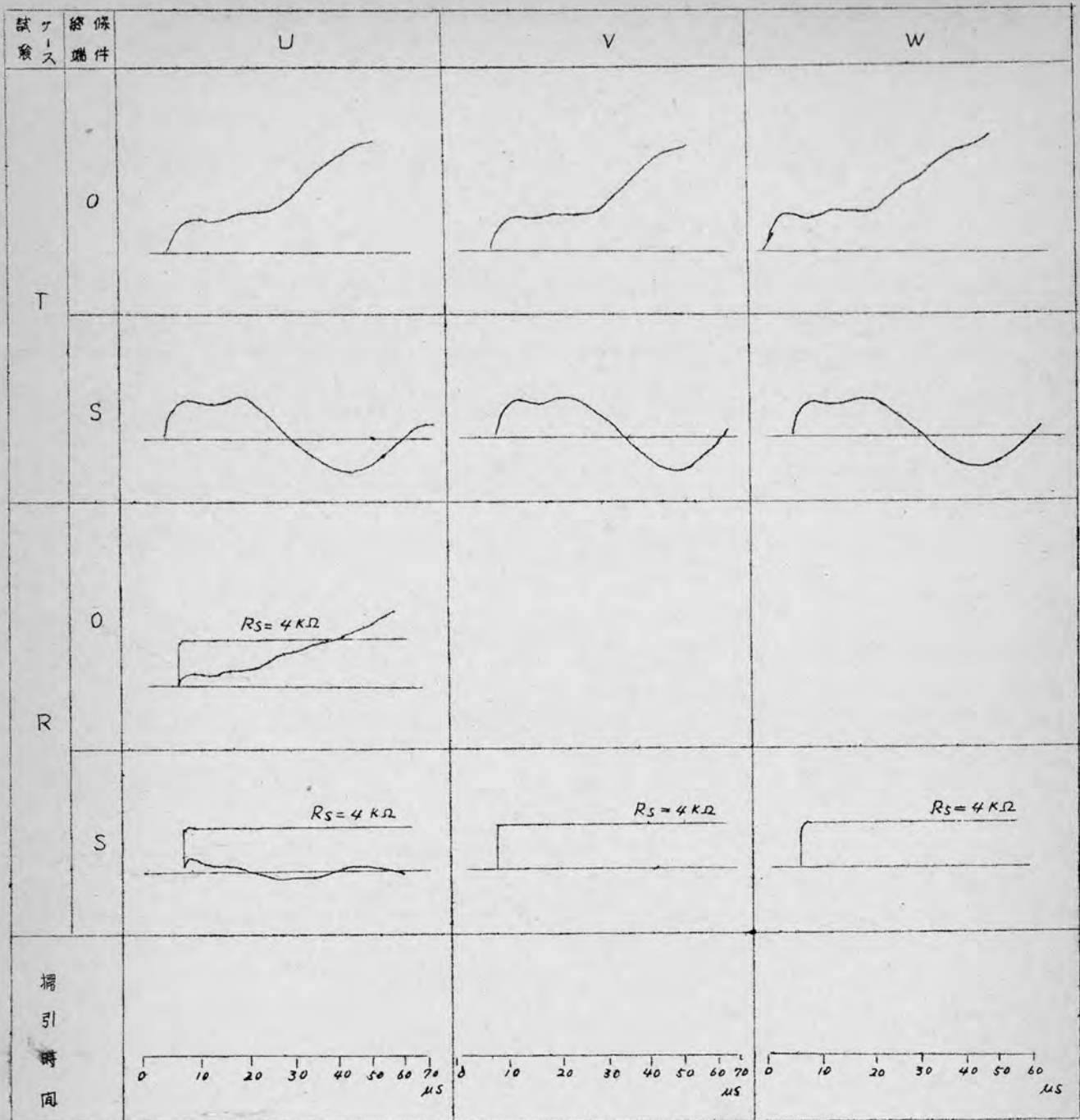
第 2. 31 図 (その 2)



第 2 . 31 図 (その 3)

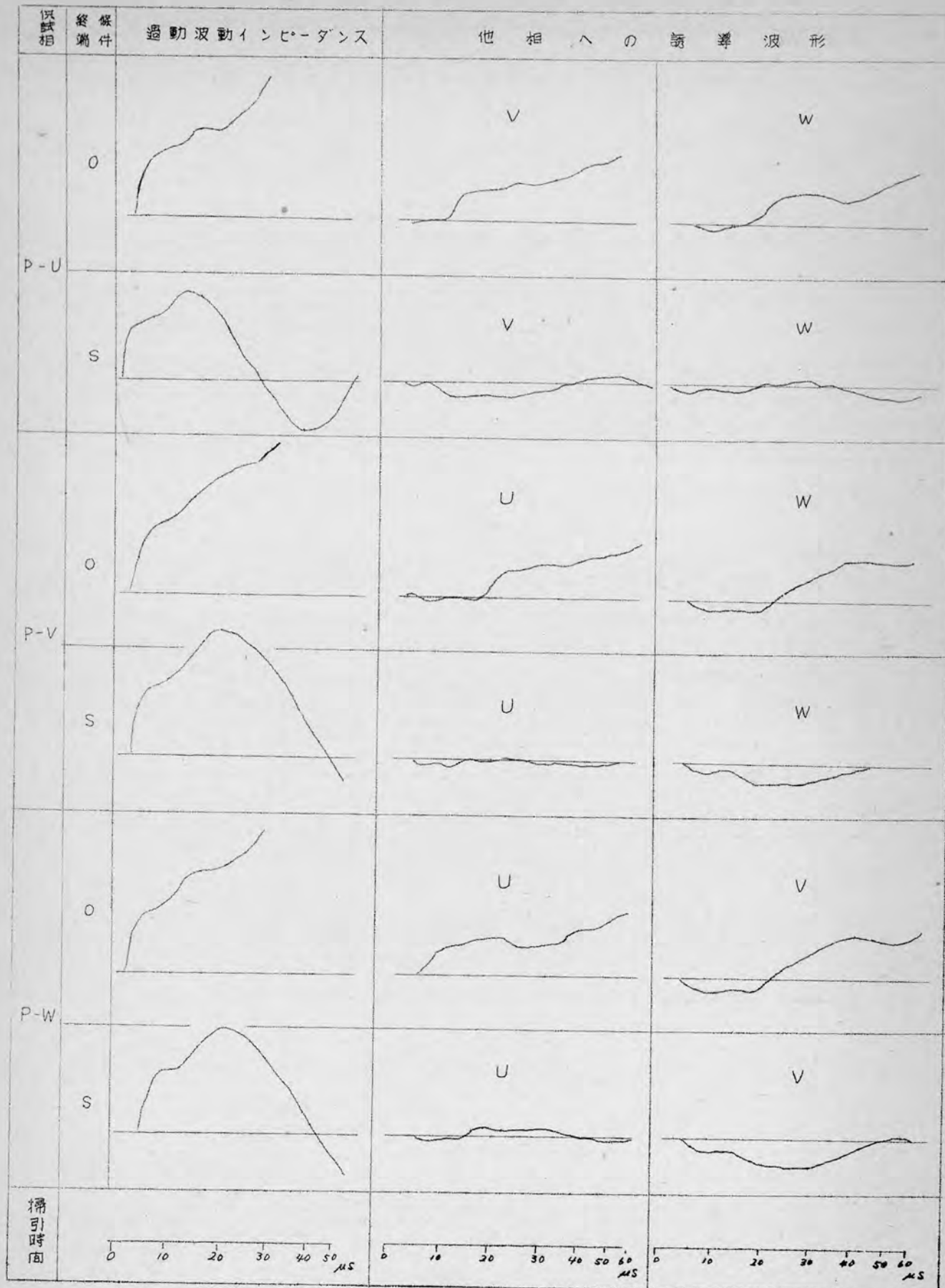


第 2 . 3 1 図 (その 4)

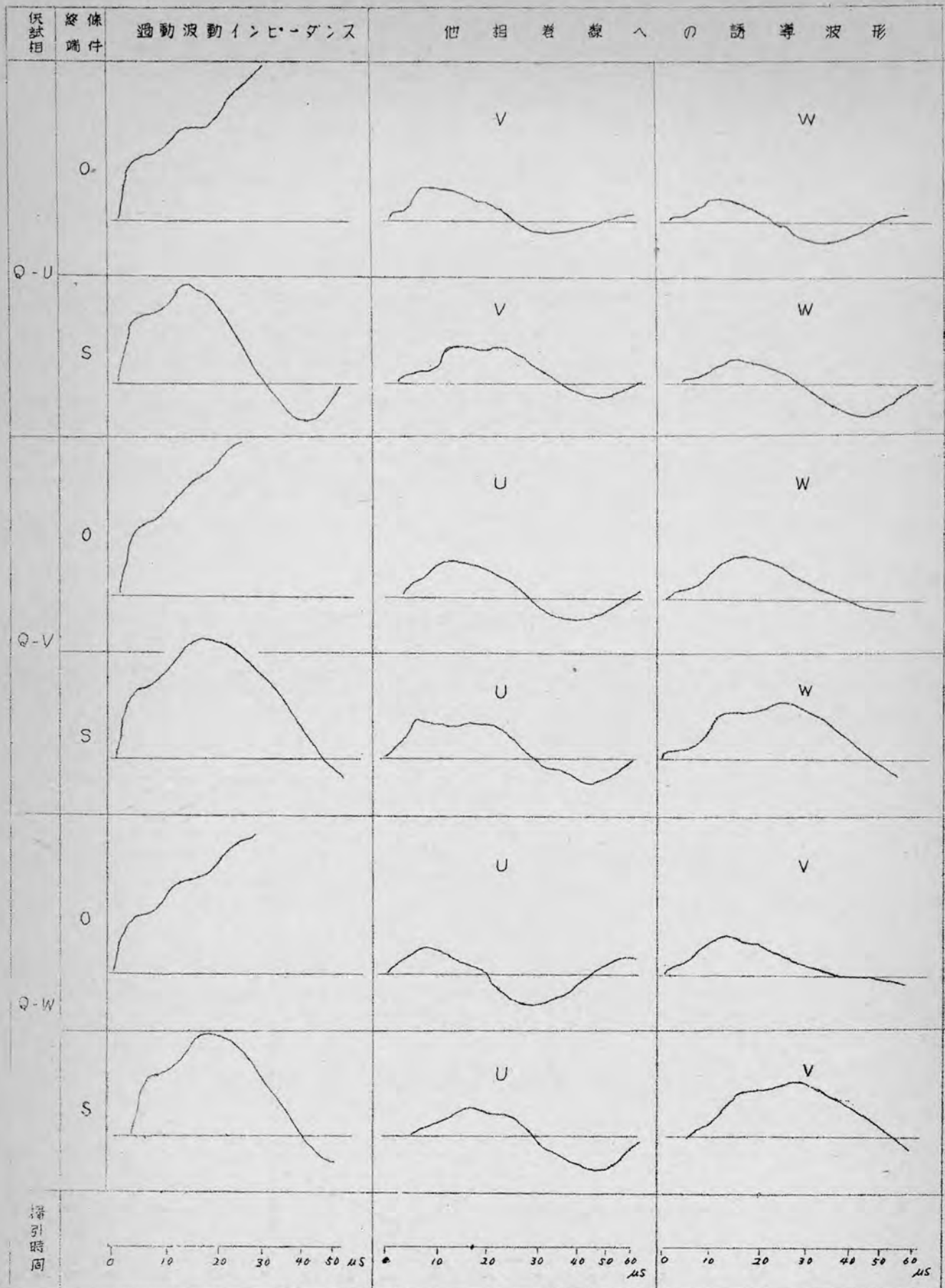


第 2. 3 図 40 KVA 過渡波動インピーダンス (その 1)

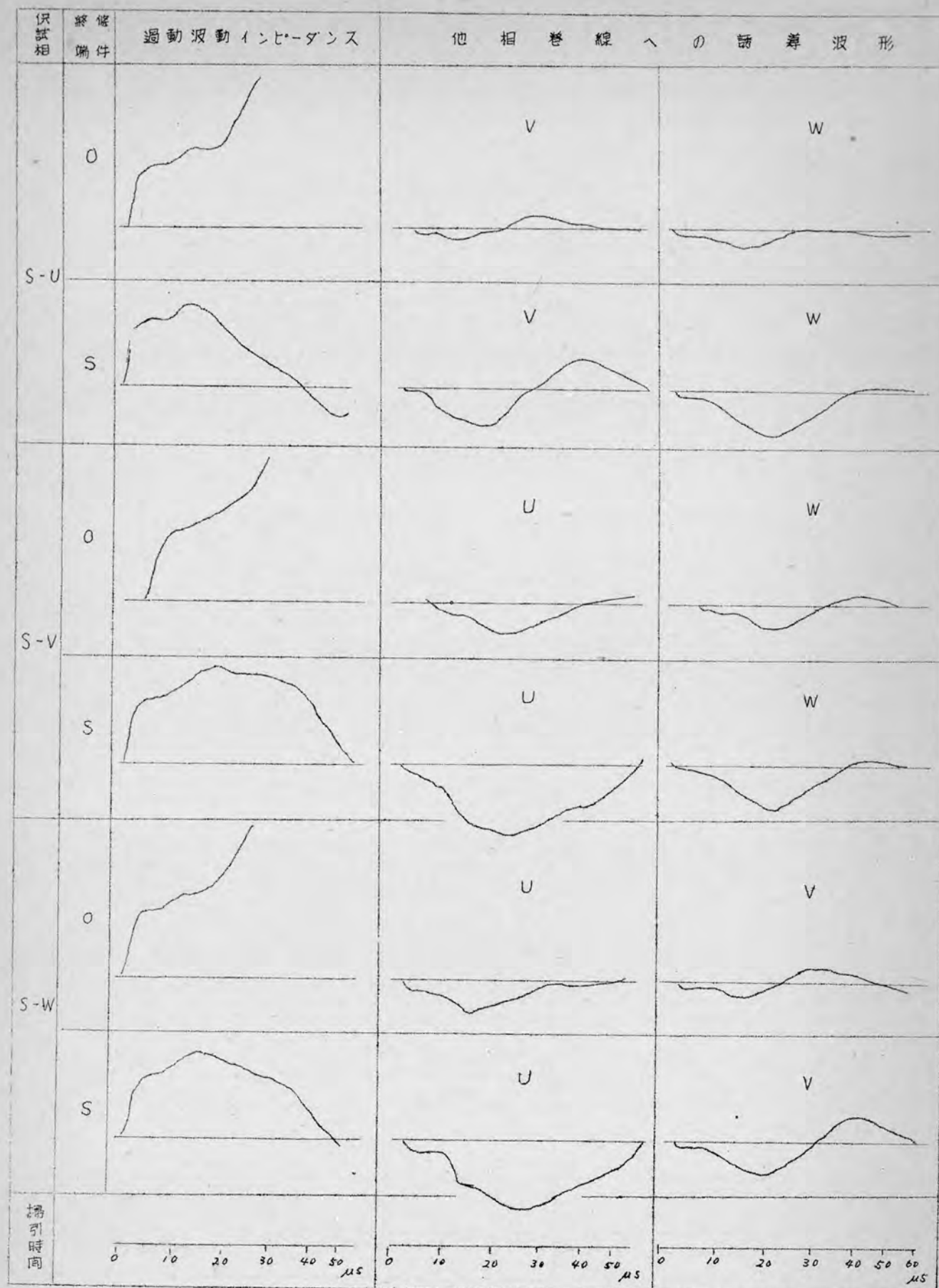
換流制御巻線を付けた場合



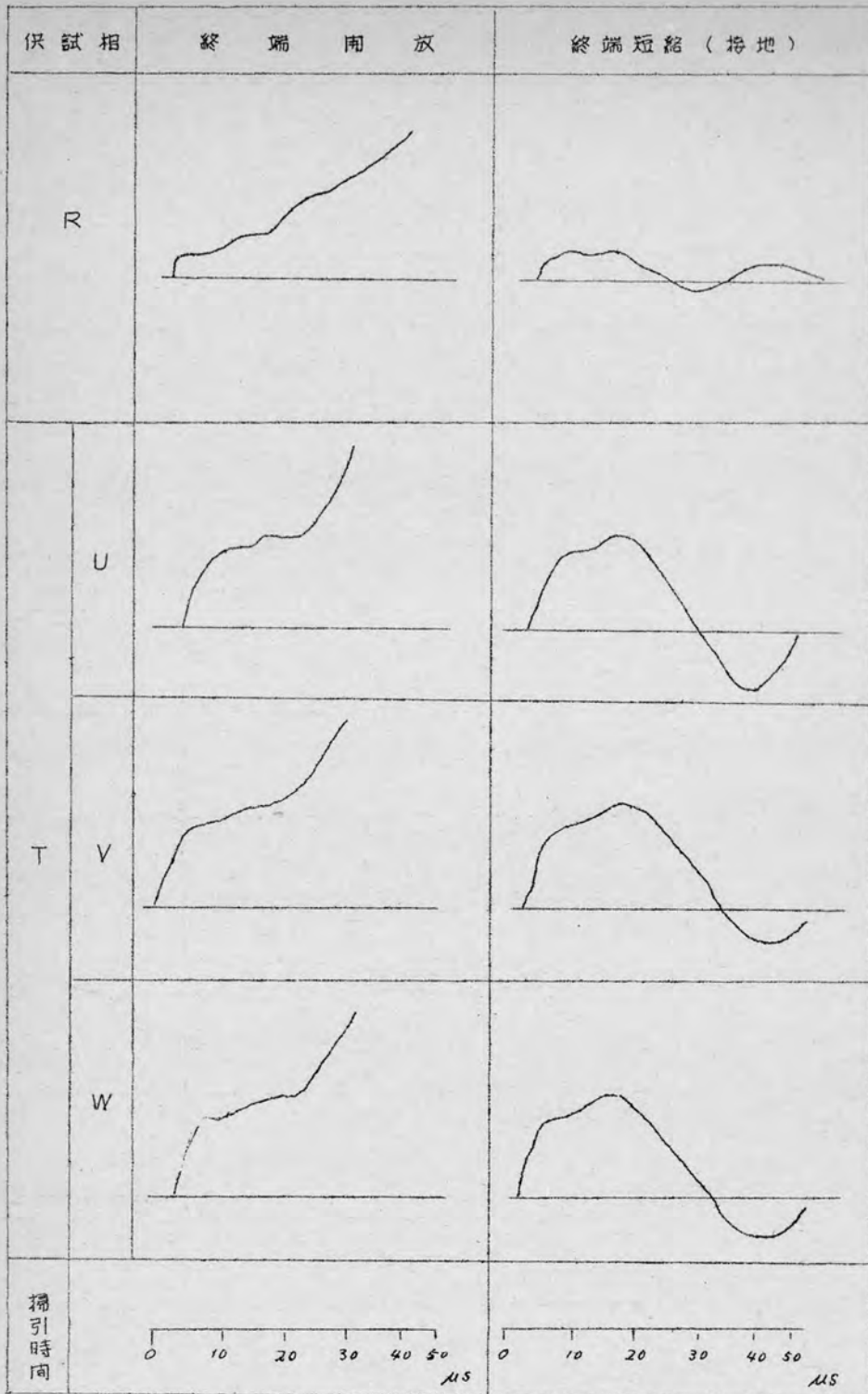
第 2. 32 図 (その 2)



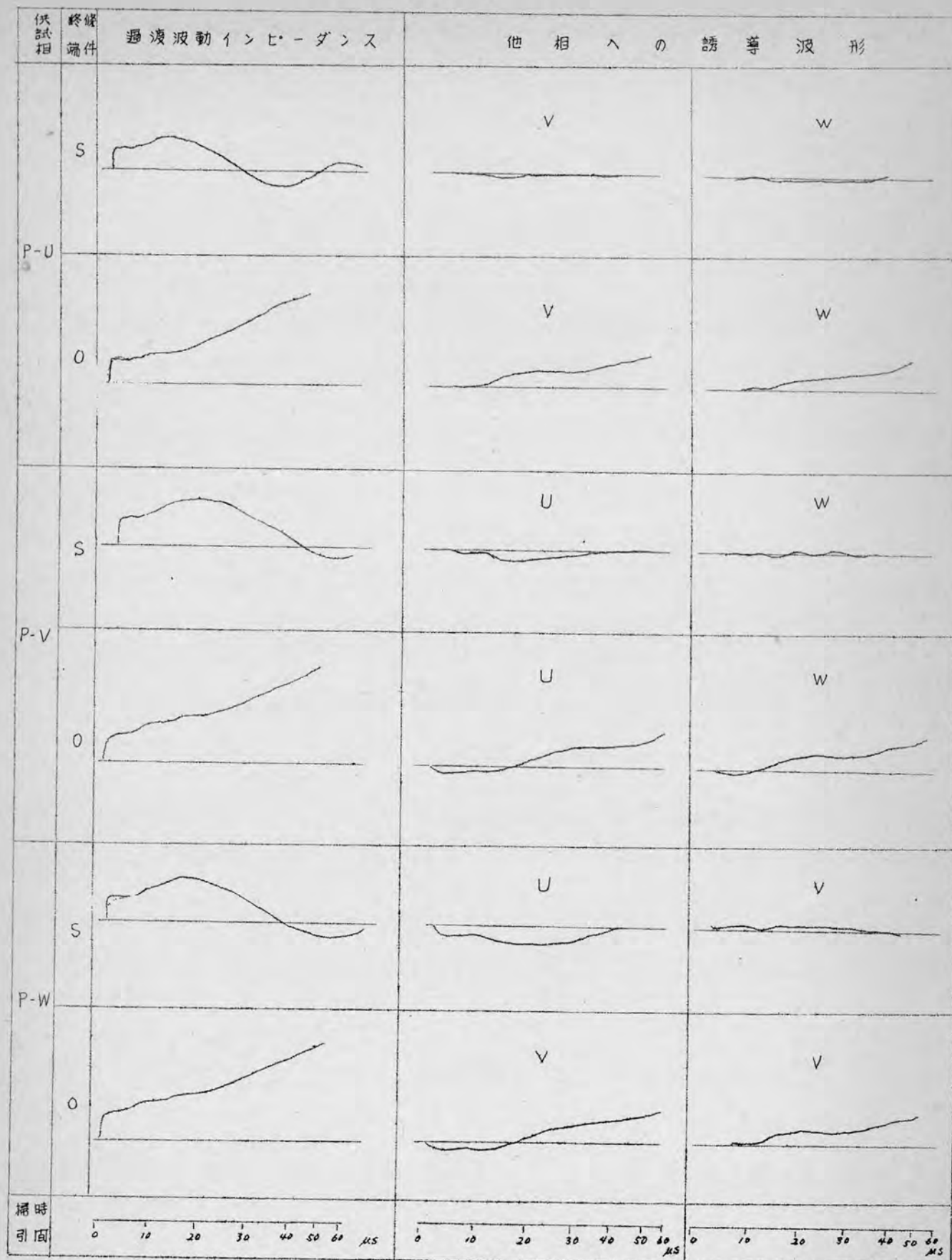
第 2 . 3 2 図 (その 3)



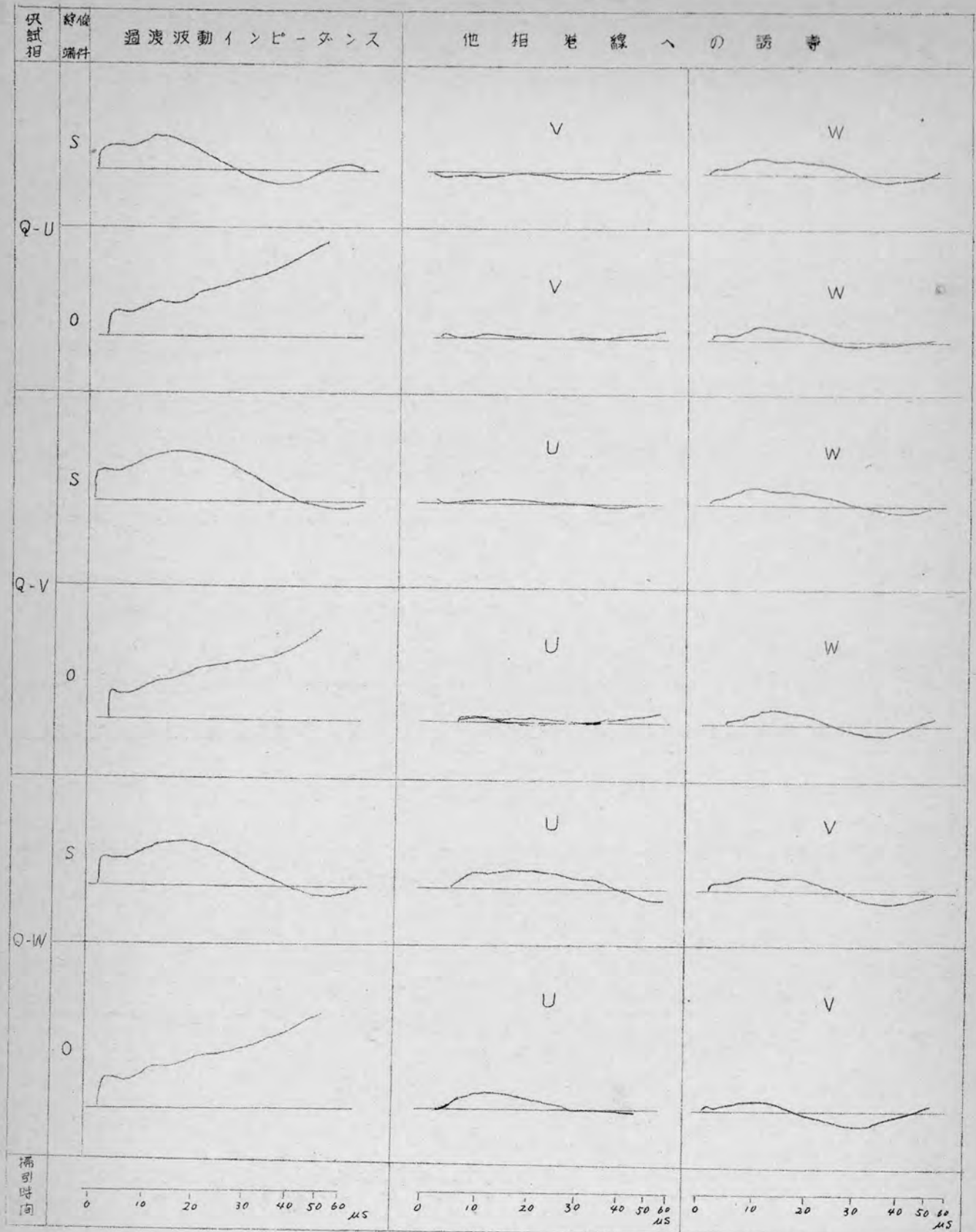
第 2. 32 図 (その 4)



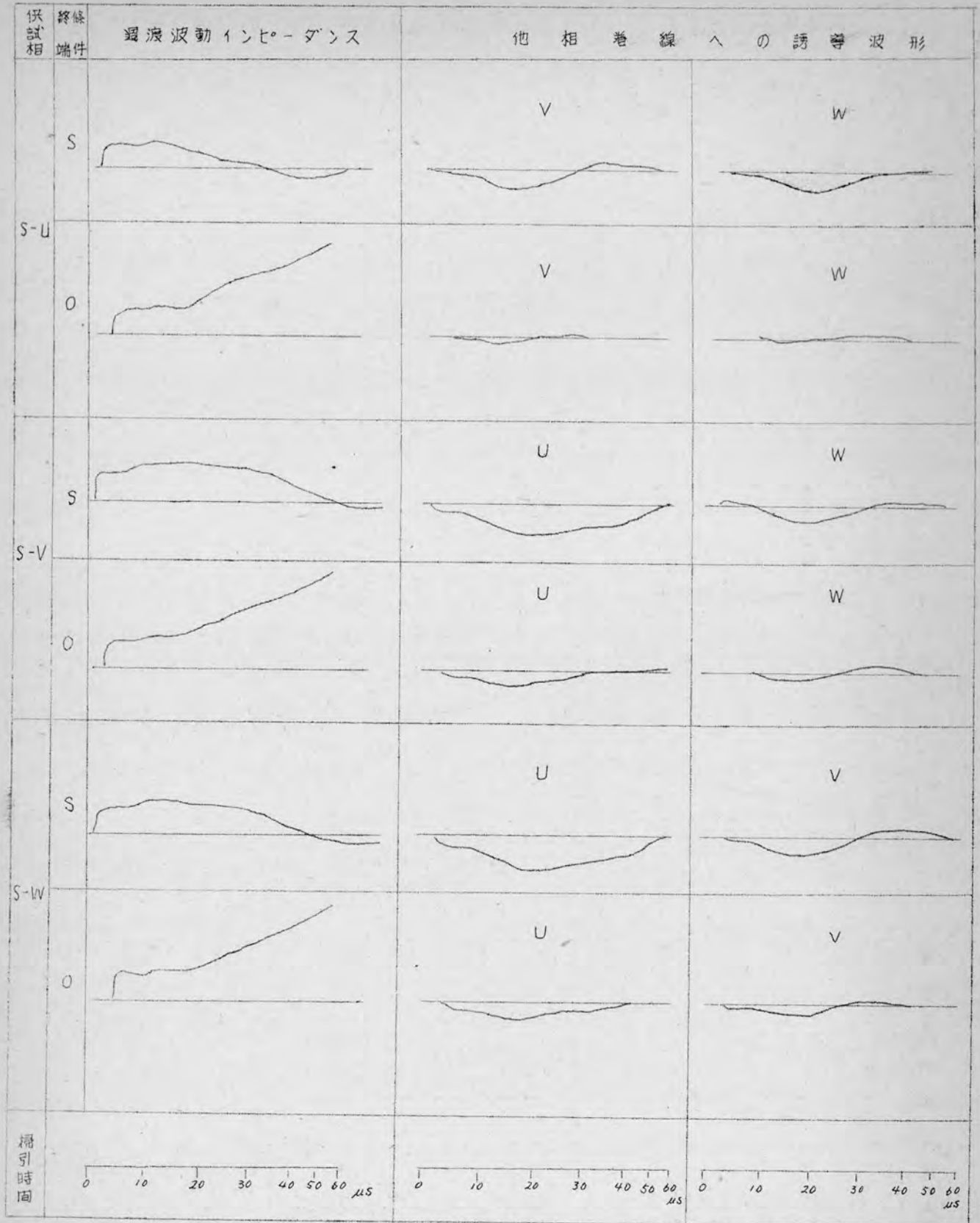
第 2. 3 3 図 40 KVA 充電機過渡波動インピーダンス (その 1)
回転子がある場合



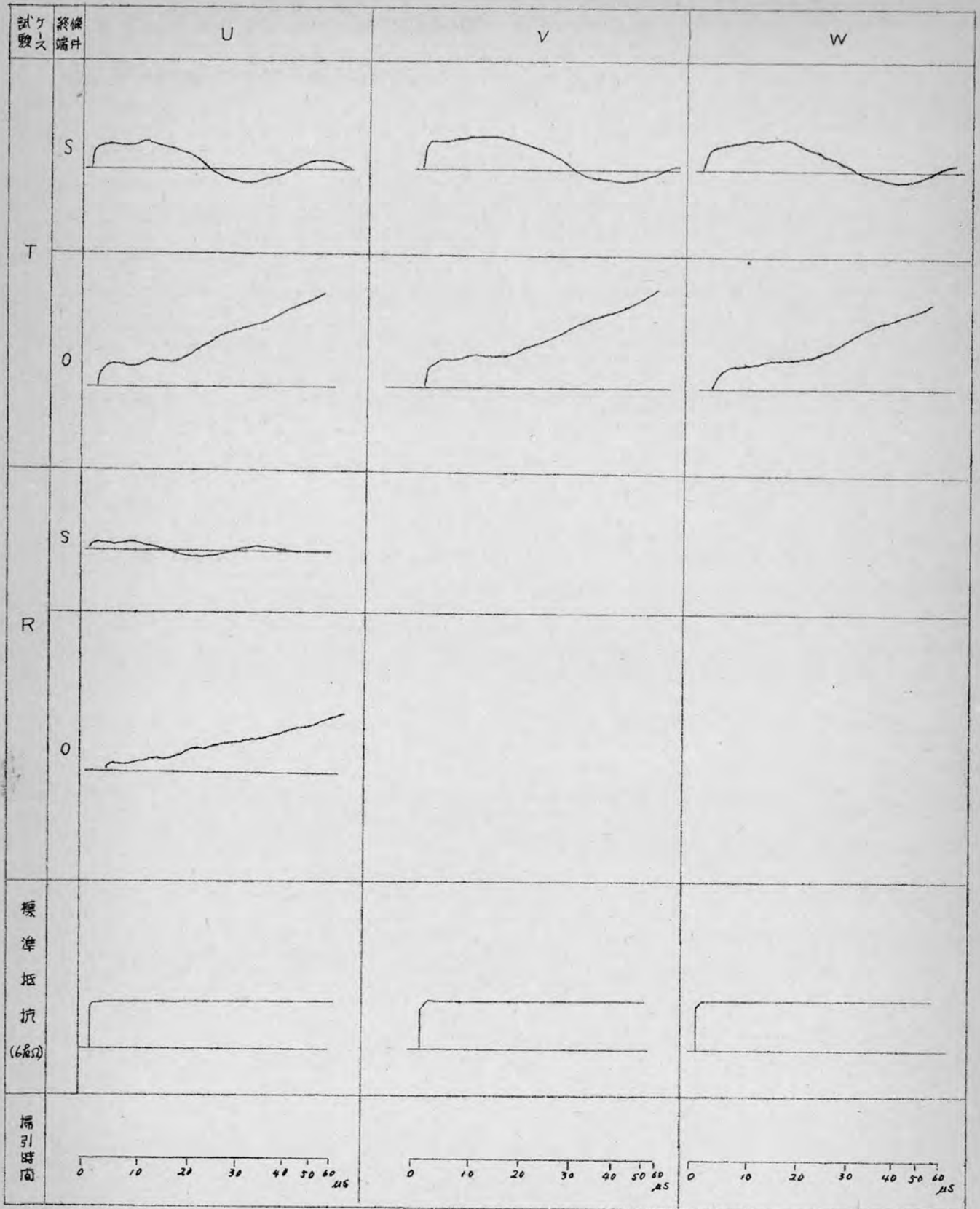
系 2. 33 図 (その 2)



第 2 . 3 3 図 (その 3)



第 2. 33 図 (その 4)



第 2 . 1 6 表

試 験 ケ ー ス	供 試 相	回 転 子 が な い 場 合			模 擬 制 動 巻 線 を 有 す る 場 合			回 転 子 が あ る 場 合		
		波 動 イ ン ピー タ ン ス (Ω)	減 衰 係 数	巻 線 を 往 復 す る 時 間 (μ s)	波 動 イ ン ピー タ ン ス (Ω)	減 衰 係 数	巻 線 を 往 復 す る 時 間 (μ s)	波 動 イ ン ピー タ ン ス (Ω)	減 衰 係 数	巻 線 を 往 復 す る 時 間 (μ s)
P	U	3.200	0.45	21.	2.800	0.40	20.5	3.300	0.56	21.
	V	"		21.	3.000		21.5	3.600	0.79	23.
	W	"	0.29	22.	2.900		21.0	3.500	0.78	22.
Q	U	3.000			2.800	0.56		3.400	0.58	
	V	"			3.000			3.600	0.80	
	W	"			2.900			3.500	0.79	
R		1.050			970	0.48		1.200	0.74	
S	U	3.000			2.800			3.300	0.65	
	V	"			3.000			3.500		
	W	"			2.900			3.500		
T	U	"			2.800	0.38		3.300	0.46	
	V	"			3.000	0.64		3.500	0.67	
	W	"			2.900	0.60		3.500	0.67	

第3章 発電機巻線の波動インピーダンス

発電機巻線の波動インピーダンスは本文において述べておいたが、電圧降下法を用いて測定した結果を一覧表にして示したのが第3.1表である。

第3.1表 発電機巻線の波動インピーダンス

試験 番号	容量 (KVA)	定格 電圧 (KV)	極数	一相の 回路数	波動インピーダンス(Ω)			備 考
					相	回転子有	回転子無	
1	4,375	1.2	10	2 Y	U	400		
					UVW	96		
2	4,800	6.6	10	2 Y	U	280	280	試験相外の巻線は一端接地 他端開放
					V	310	280	
					W	350	280	
					UVW	75	70	
3	25,000	11	12	4 Y	U	145		同上
4	4,500	3.5	10	2 Y	U	195	157	試験相外の巻線は一端接地 他端開放
					UVW	36	31	

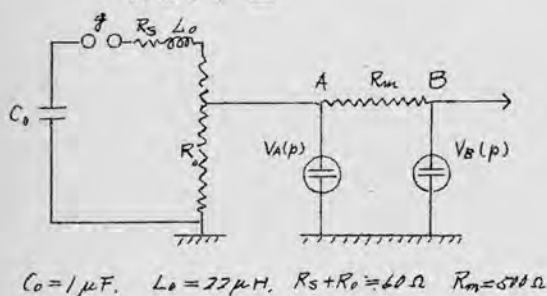
なお、電圧降下法は大体第3.1図に示す回路によりて実施した。巻線の波動

インピーダンス $Z(p)$ は(3.1)式より求める。

$$Z(p) = \frac{R_m V_B(p)}{V_A(p) - V_B(p)} \quad \text{--- (3.1)}$$

但し $V_A(p)$ 、 $V_B(p)$ は第3.1図 A、B 点の電圧である。第3.1表の測定では $R_m = 500 \Omega$ である。

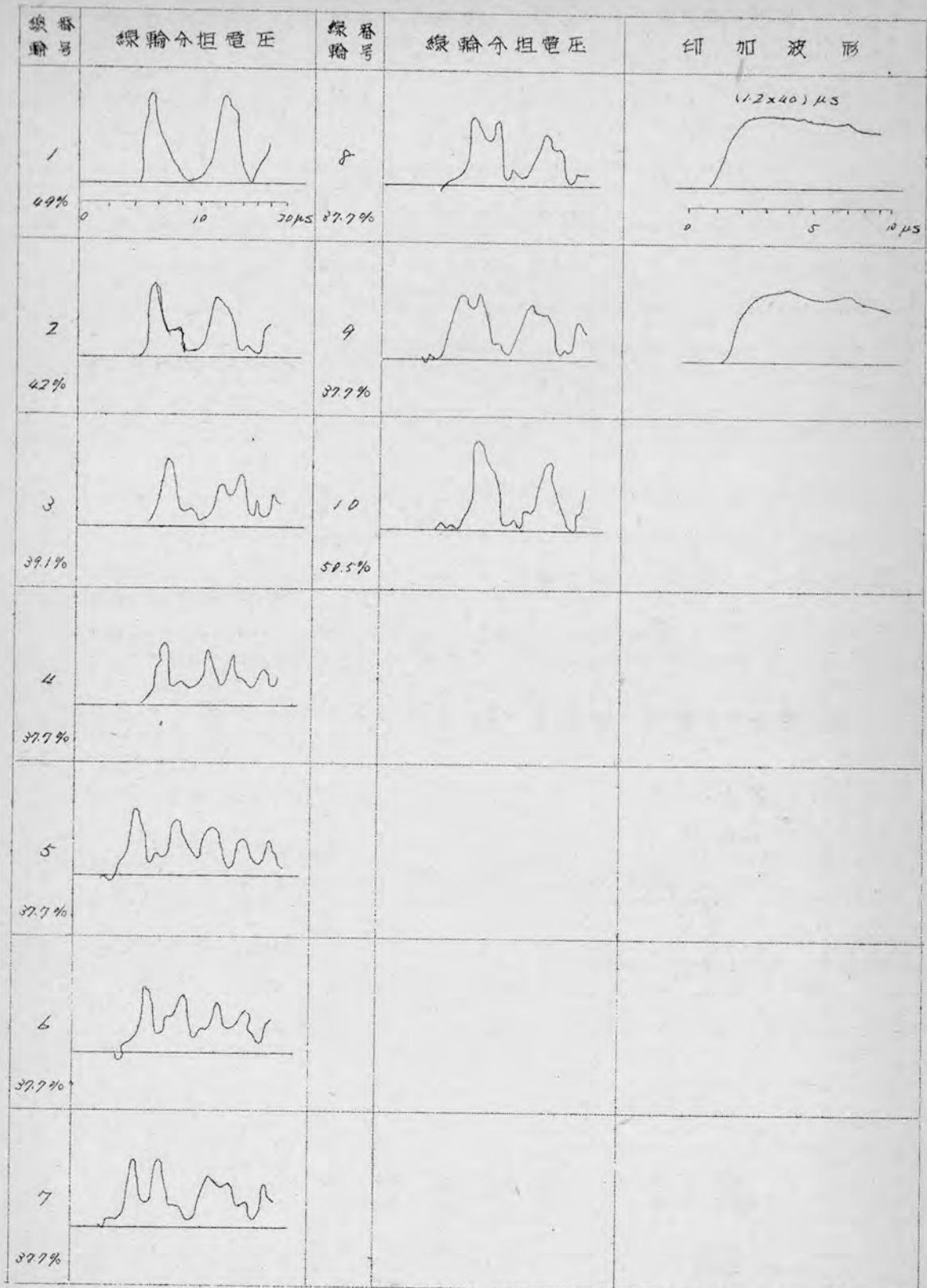
第3.1図



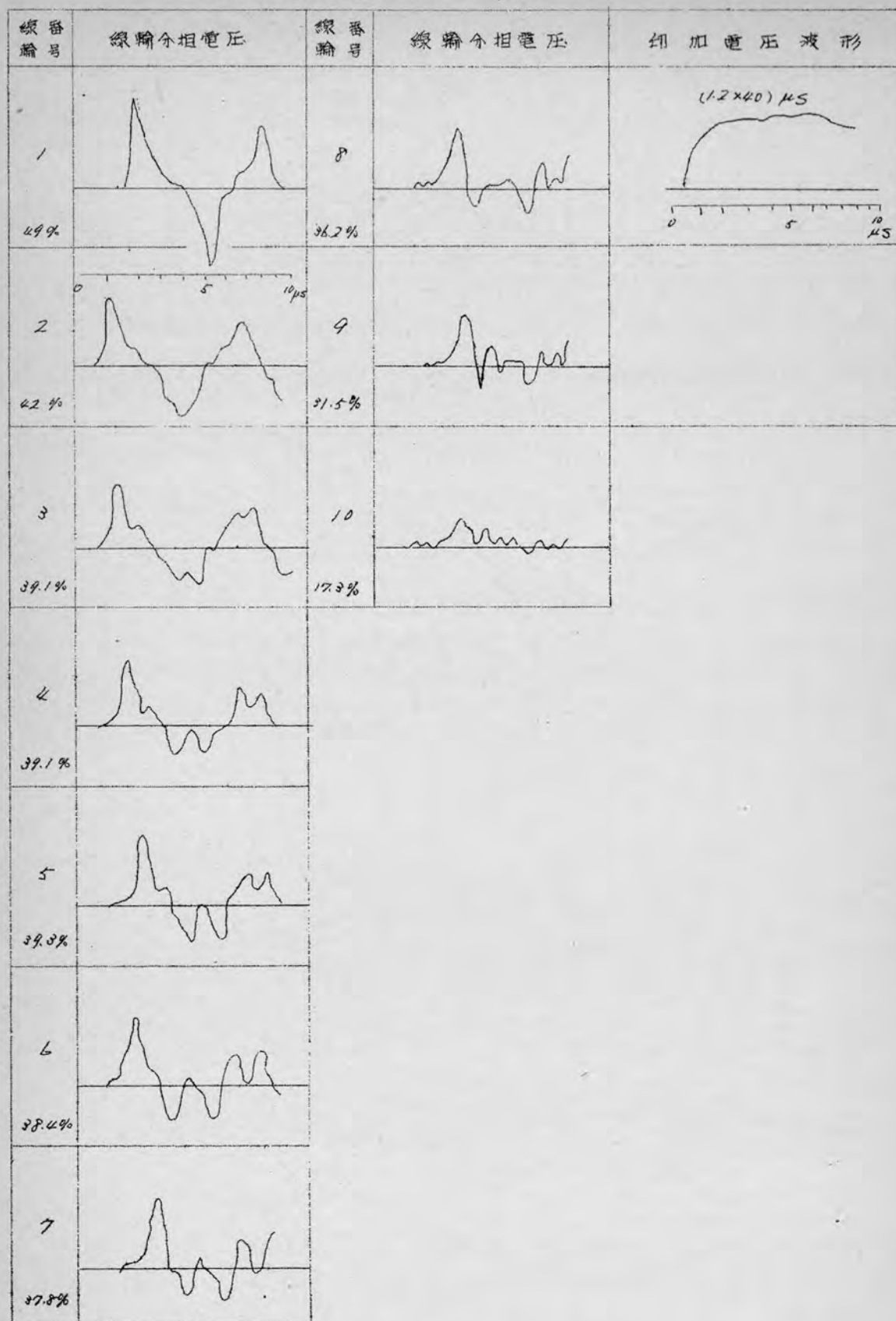
第4章 巻線の電圧分布

(1) 11000 KVA 発電機巻線 10 本を直列に接続し、線間分担電圧を測定した。その結果が第4.1図、第4.2図および第4.3図である。

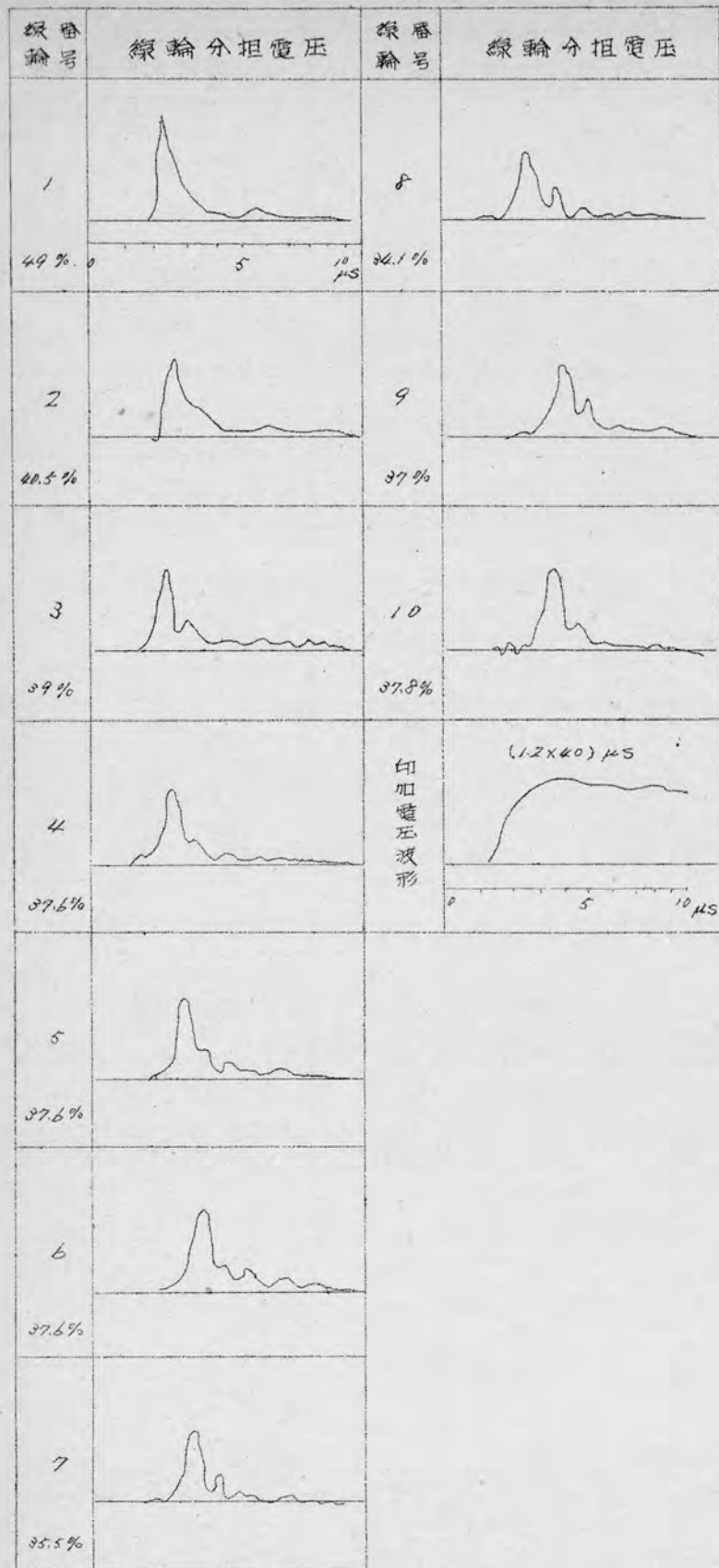
第4.1図 10本の線輪を直列に接続した場合中性点を接地した時の線輪分担電圧



第4.2図 10本の線路を直列に接続した場合中性点を開放した時の線路分担電圧

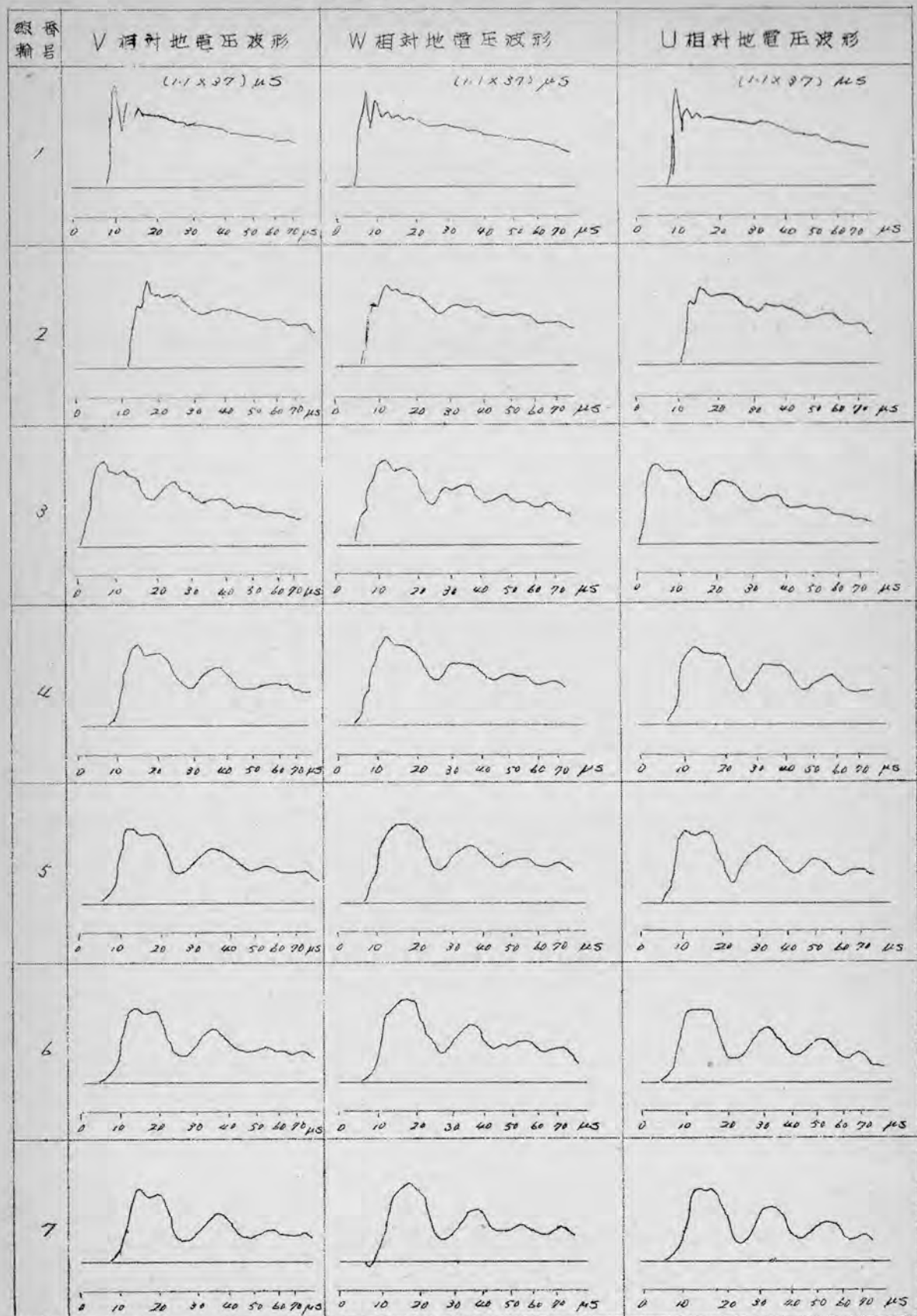


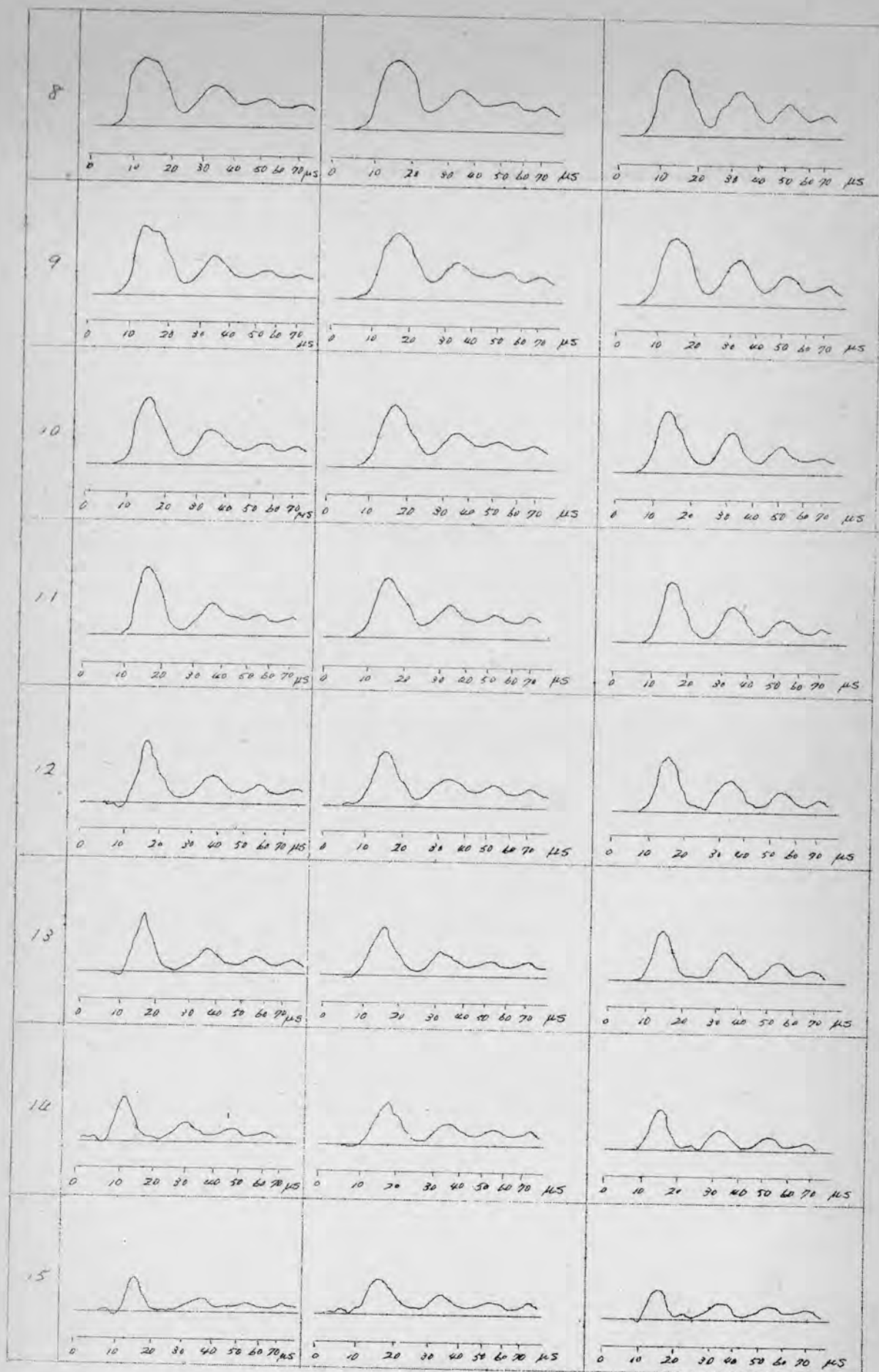
第4.3図 10本の線輪を直列に接続した場合中性点を200Ωにて接地した時の線輪分担電圧

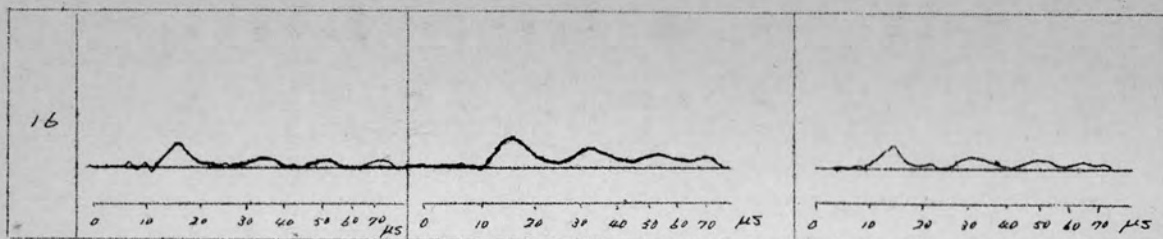


(2) 400 KVA 発電機の各相巻線の対地電圧波形

第4.4図 400 KVA 発電機三相一括して印加した線の
各相巻線の絶縁対地電圧波形

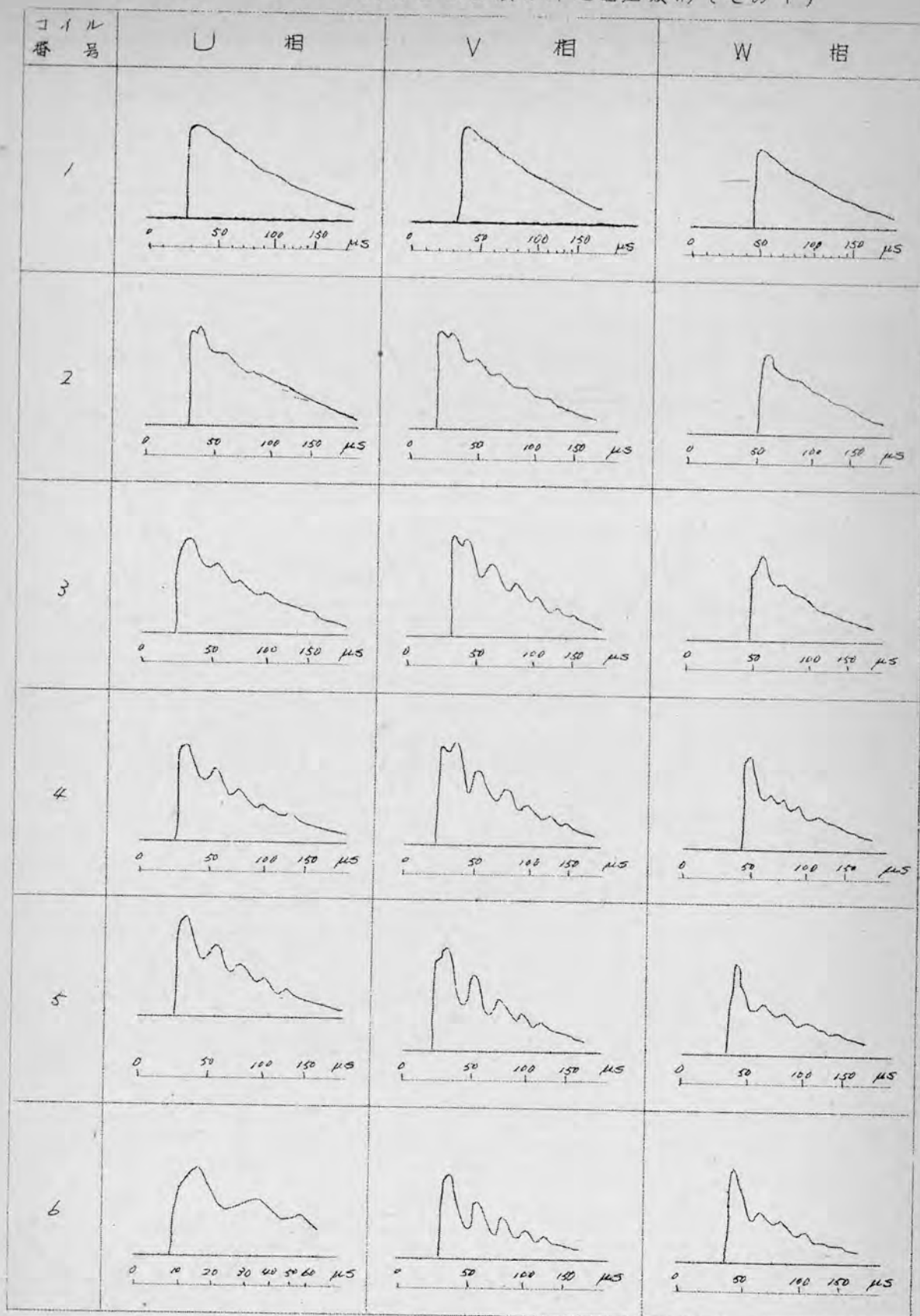






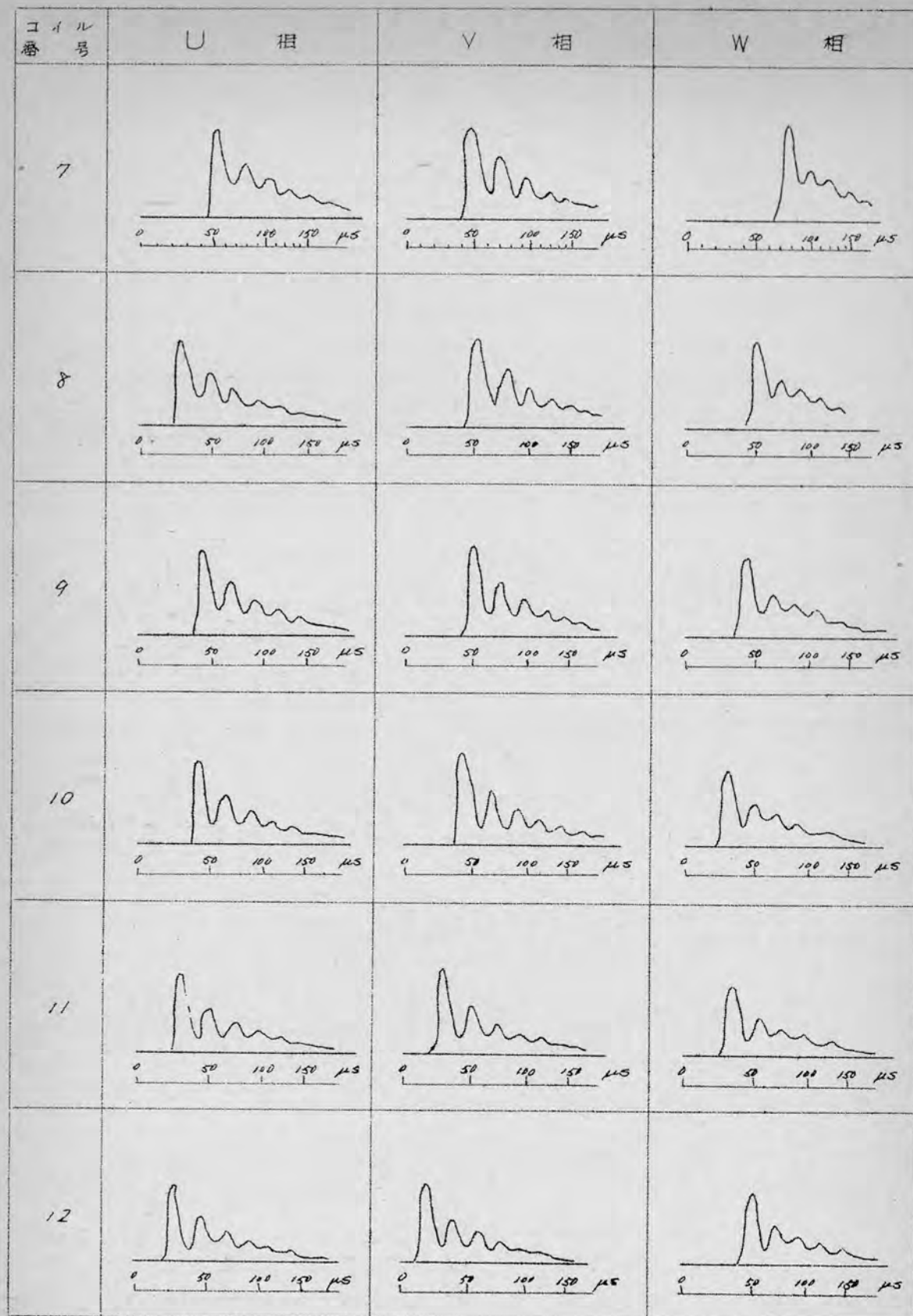
(3) 40 KVA 発電機三相一括時の各相巻線の対地電圧

第4.5図 三相一括時の各相巻線の対地電圧波形(その1)



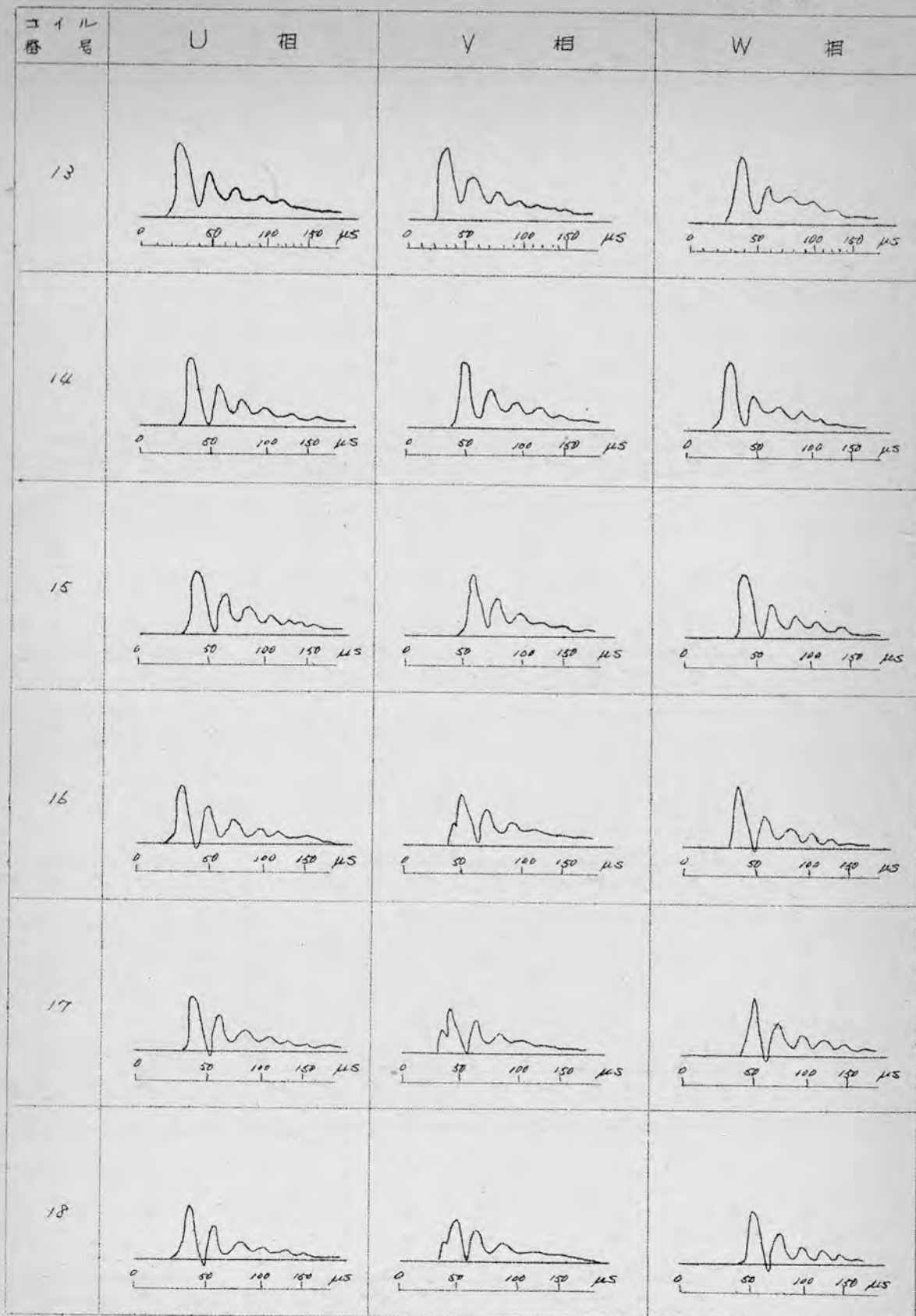
第4.5図

(その2)



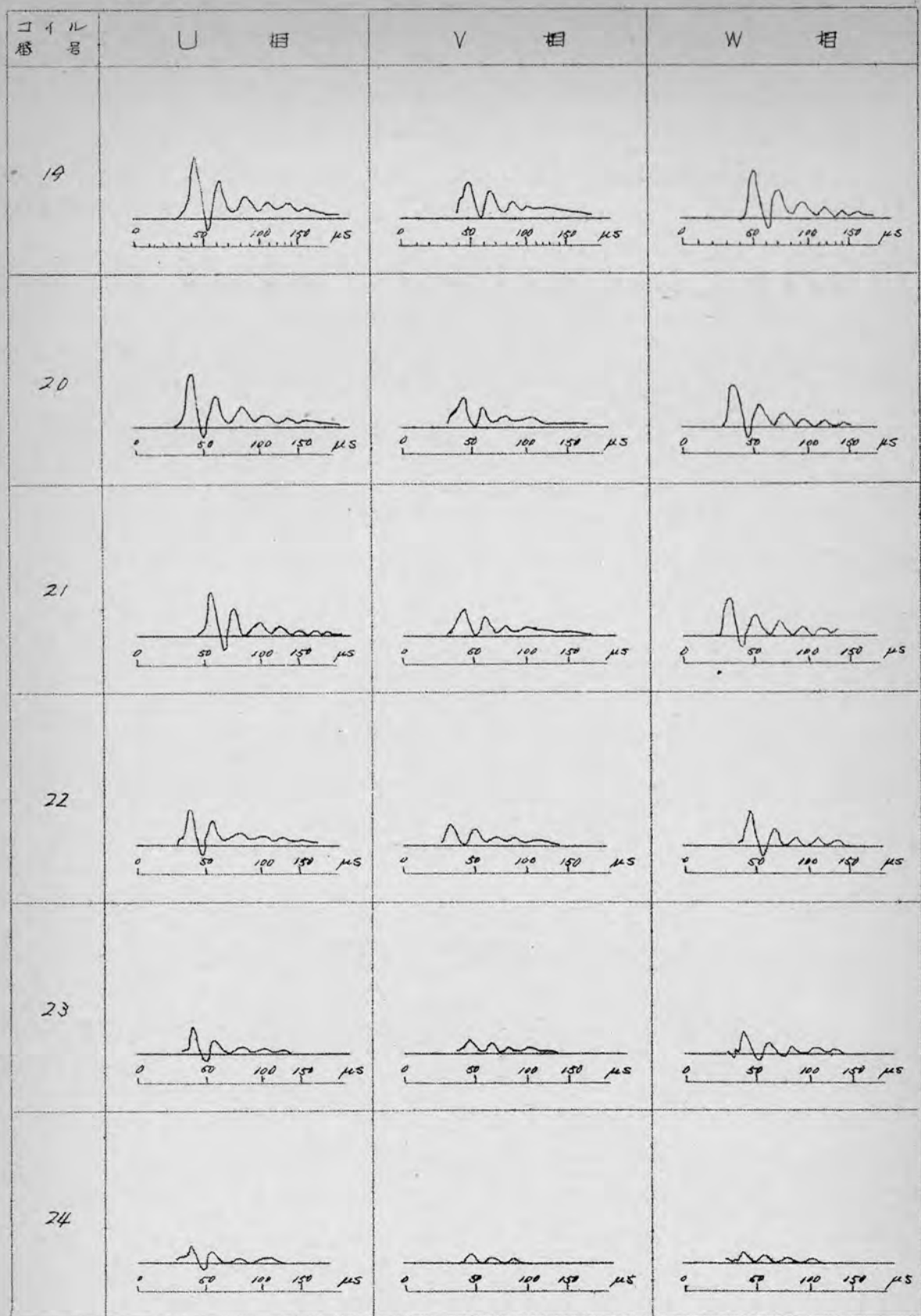
第4.5図

(その3)



第4.5図

(その4)



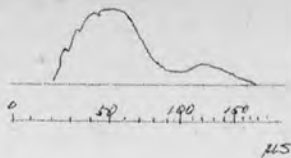
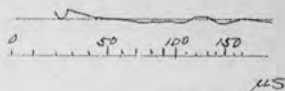
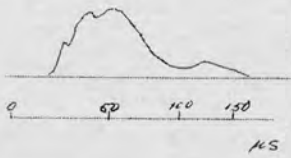
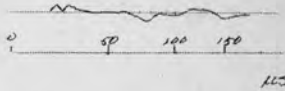

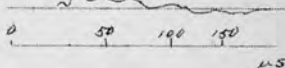
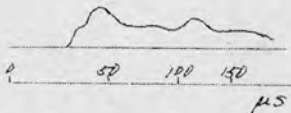
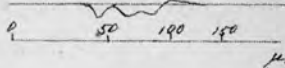
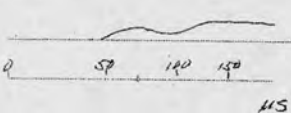
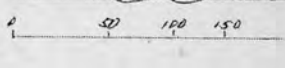
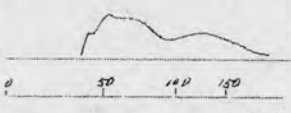

第5章 圓轉子巻線への誘起電 圧のオッシログラム

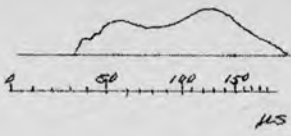
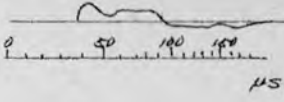

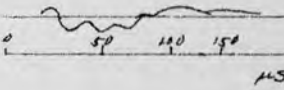
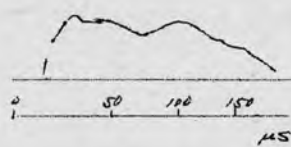
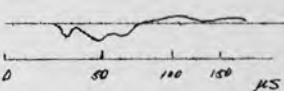

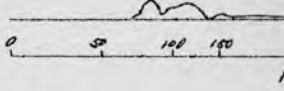

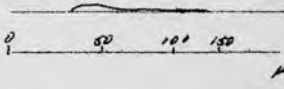
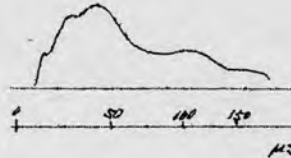
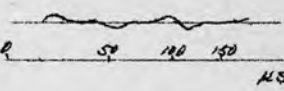
制動巻線をもっている11,000 KVA発電機とをもっていない11,000 KVA発電機の圓轉子巻線への誘起電圧を測定したオッシログラムを示すと第5.1図、第5.2図である。第5.1図は制動巻線がない発電機、第5.2図は制動巻線を有する発電機の場合である。

誘起電圧の大きさは本文第4章、第4.3表および第4.4表にそれぞれ示してある。

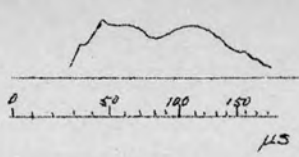
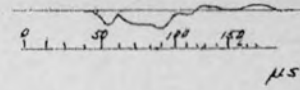
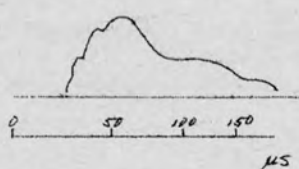
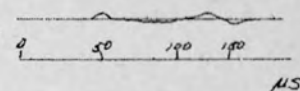
第5.1図 制動巻線をもたない発電機(11000 K.V.A)の
回転子巻線の誘起電圧

印加相	印加波形	巻線/開閉	回転子両端電圧	回転子対地電圧
U	(1×40) μs	開		
V	(1×40) μs	開		
W	(1×40) μs	開		
UV	(1×40) μs	開		
UW	(1×40) μs	開		
VW	(1×40) μs	開		




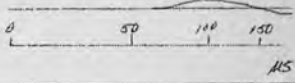
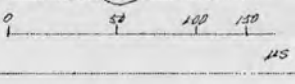
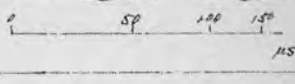
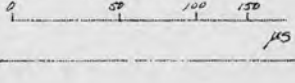
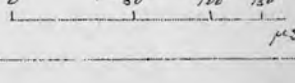








印加相	印加波形	中41 南南	回教子面端电压	回教子对地电压
三相一搭	(1×40) μS	南		
三相一搭	(1×40) μS	南		
U	(1×40) μS	南		
V	(1×40) μS	南		
W	(1×40) μS	南		
UV	(1×40) μS	南		

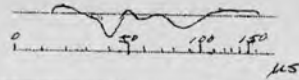





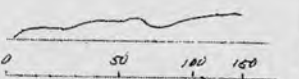

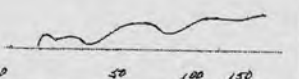



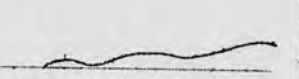



印加相	印加波形	#41 雨雨	回數子西端電压	回數子对地電压
UW	(1 × 40) μS	閉		
VW	(1 × 40) μS	閉		
VW	(1 × 80) μS	閉		
UW	(1 × 80) μS	閉		
UV	(1 × 80) μS	閉		
三相一括	(1 × 80) μS	閉		

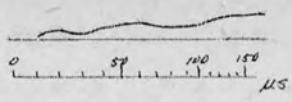

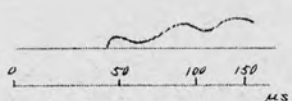
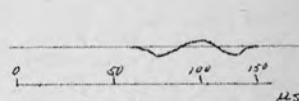
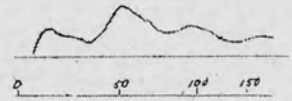
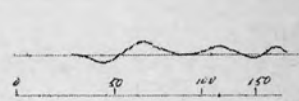
印加相	印加波形	井口/井底	回振子两端电压	回振子对地电压
U	(1 × 80) μ S	闭		
V	(1 × 80) μ S	闭		
W	(1 × 80) μ S	闭		
U	(1 × 80) μ S	开		
V	(1 × 80) μ S	开		
W	(1 × 80) μ S	开		

印加相	印加波形	井口/南	回振子两端电压	回振子对地电压
UV	(1 x 80) μS	南		
UW	(1 x 80) μS	南		

第5.2図 制動巻線を有する発電機(11,000 KVA)の
回転子巻線の誘起電圧

印加相	印加波形	巻線/周波	回転子両端電圧	回転子対地電圧
U	(1 × 40) μ S	閉		
V	(1 × 40) μ S	閉		
W	(1 × 40) μ S	閉		
UV	(1 × 40) μ S	閉		
三相一括	(1 × 40) μ S	閉		
U	(1 × 40) μ S	開		
V	(1 × 40) μ S	開		
UV	(1 × 40) μ S	開		

印加粗	印加波形	开关 时间	回振子两端电压	回振子对地电压
三相一搭	(1 × 40) μs	闭		
U	(1 × 80) μs	闭		
V	(1 × 80) μs	闭		
W	(1 × 80) μs	闭		
UV	(1 × 80) μs	闭		
三相一搭	(1 × 80) μs	闭		
U	(1 × 80) μs	闭		
V	(1 × 80) μs	闭		

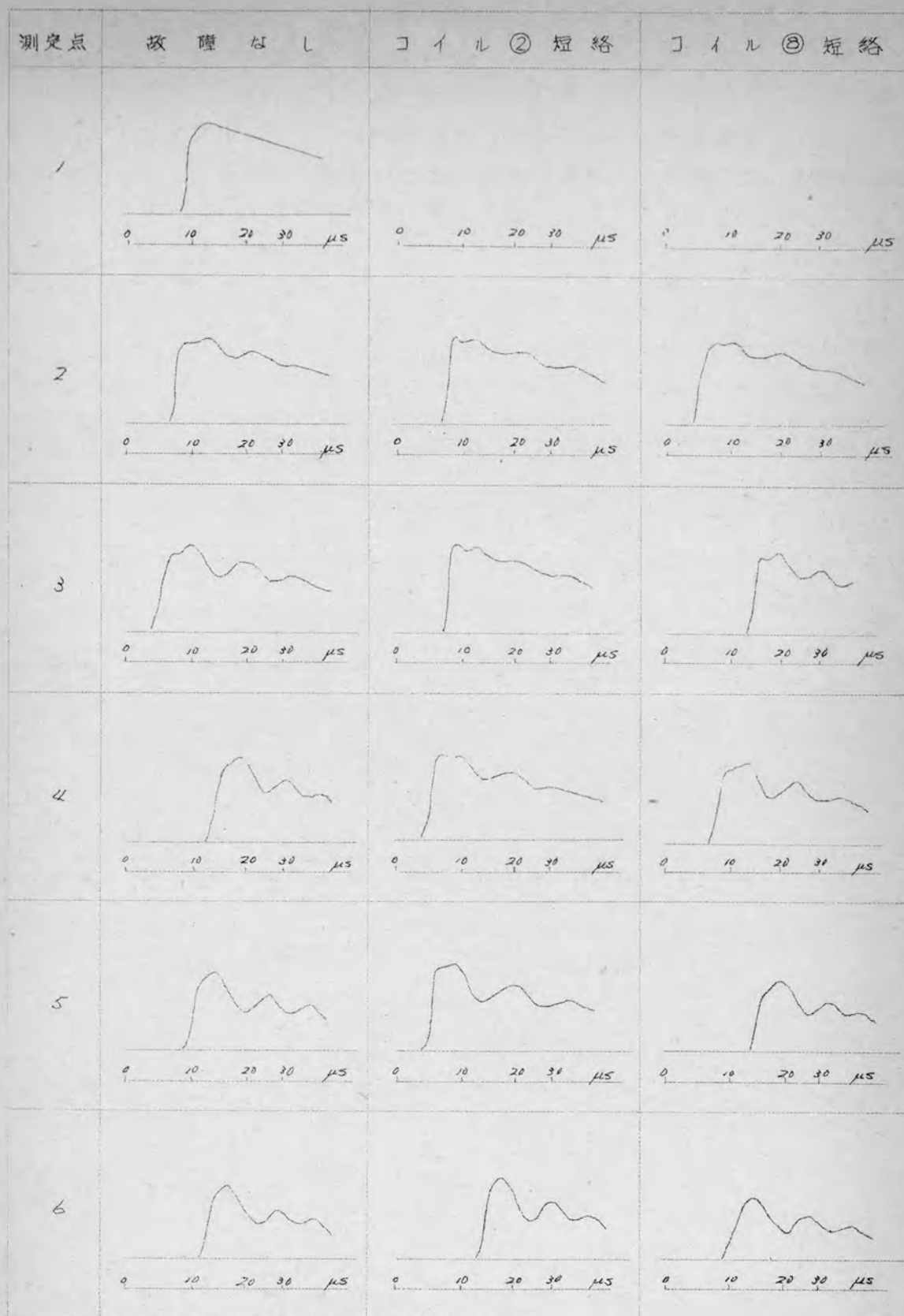
印加相	印加波形	井 41 南南	回振子兩端電壓	回振子對地電壓
W	(1×80) μs	南		
UV	(1×80) μs	南		
三相一搭	(1×80) μs	南		

第6章

短絡による対地電圧および 分担電圧の変化

40KVA発電機のV相巻線の24本線輪のうち12本を使用して、V相の
出力端子より2番目、8番目を短絡した時の巻線の対地電圧 および分担電圧
のオシログラムを示したのが第6.1図、第6.2図である。

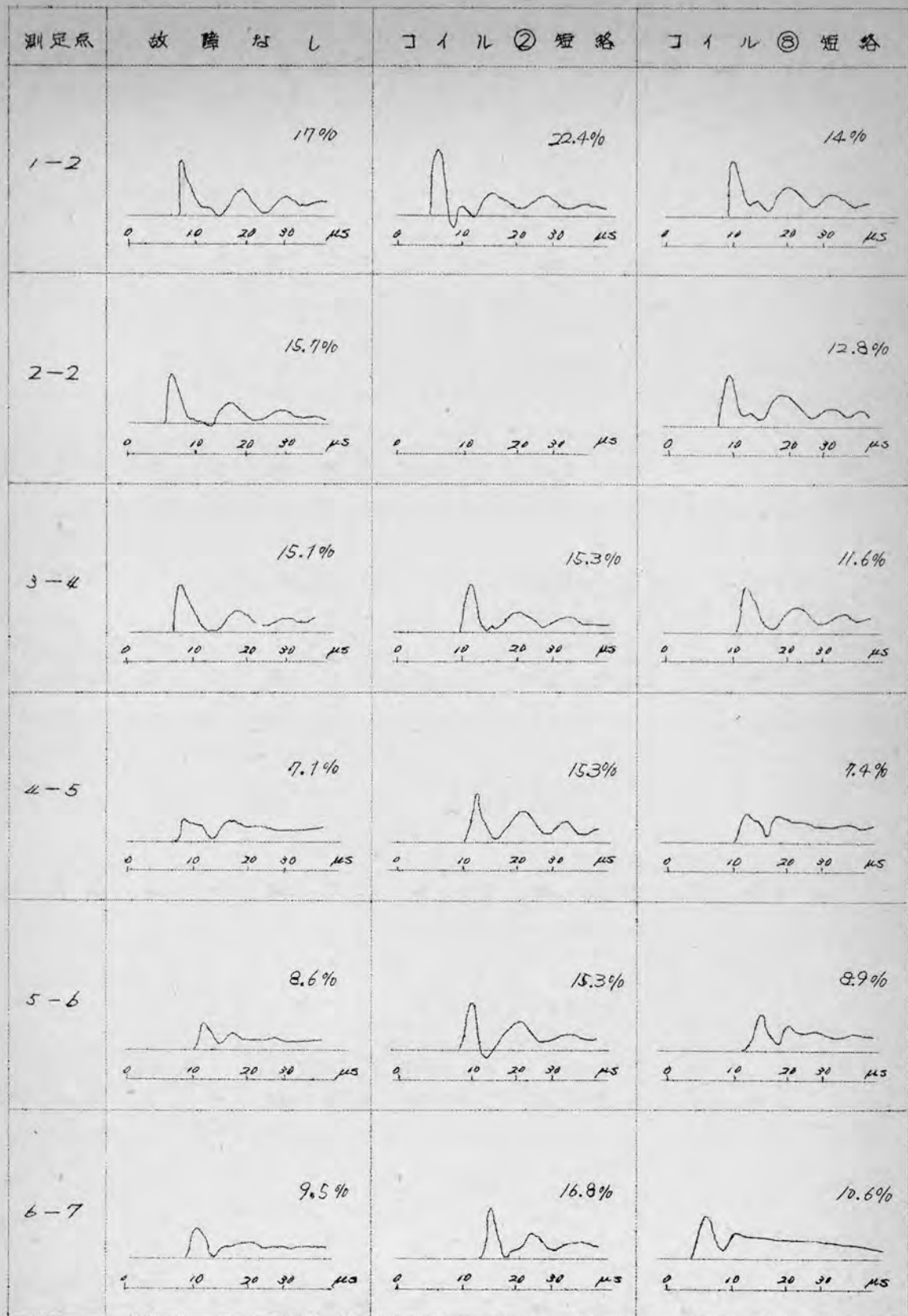
第6.1図 V 相対地電圧の短絡による変化



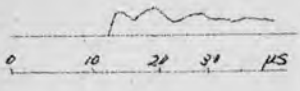
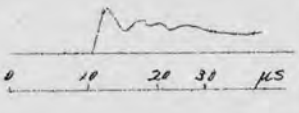
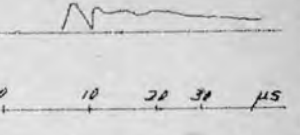
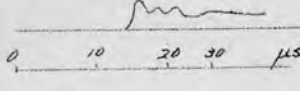
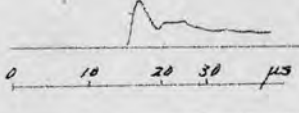
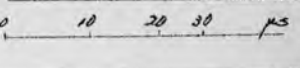
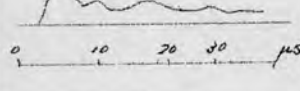
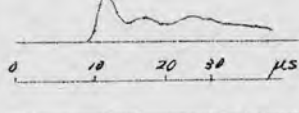
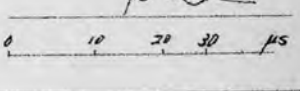
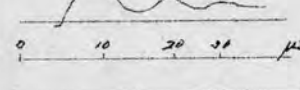
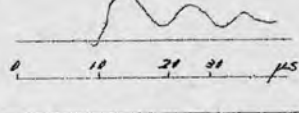
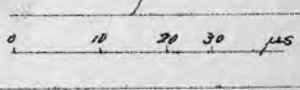
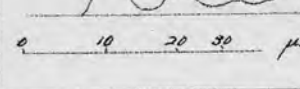
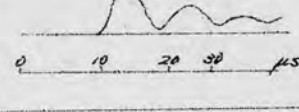
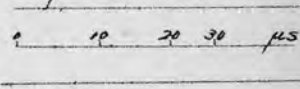
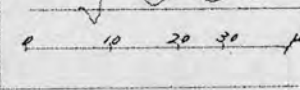
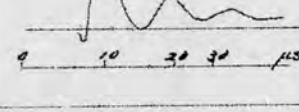
V 相 対 地 電 圧



第6.2図 V相分担電圧の短絡による変化



V 極 分 組 電 圧

測定系	故障なし	コイル②短絡	コイル③短絡
7-8	6.5% 	11.4% 	6.7% 
8-9	7.5% 	12.0% 	
9-10	8.6% 	12.6% 	5.2% 
10-11	9.7% 	13.4% 	9.2% 
11-12	10.8% 	15.3% 	10.5% 
12-13	12.8% 	15.7% 	11.0% 